كراسات علمية

سلسلة غير دورية تعنى بالإتجاهات العلمية الحديثة

نبذة مختصرة عن

فيزياء البلازما وتطبيقاتها

دكتور/ جمال جابر مصطفى

تصدرها:
المكتبة الأكاديمية

رئيس التحرير
أ. د. أحمد شوقى

مدير التحرير
أ. أحمد أمين

المكتبة الأكاديمية

كراسات "علمية"

سلسلة غير دورية تصدرها المكتبة الأكاديمية تعنى بتقديم الاجتهادات الفكرية والعلمية ذات التوجه المستقبلى

رئيس التحرير أ. د. أحمد شوقى   مدير التحرير أ. أحمد أمين

المراسلات:

المكتبة الأكاديمية

شركة مساهمة مصرية

رأس المال المصدر والمدفوع ١٨,٢٨٥,٠٠٠ جنيه مصرى

١٢١ شارع التحرير - الدقى - الجيزة

القاهرة - جمهورية مصر العربية

تليفون : ٢٧٤٨٥٢٨٢ - ٣٣٣٦٨٢٨٨ (٢٠٢)

فاكس : ٣٧٤٩١٨٩٠ (٢٠٢)

UKAS QUALITY MANAGEMENT

المكتبة الأكاديمية

شركة مساهمة مصرية

الحاصلة على شهادة الجودة

ISO 9002

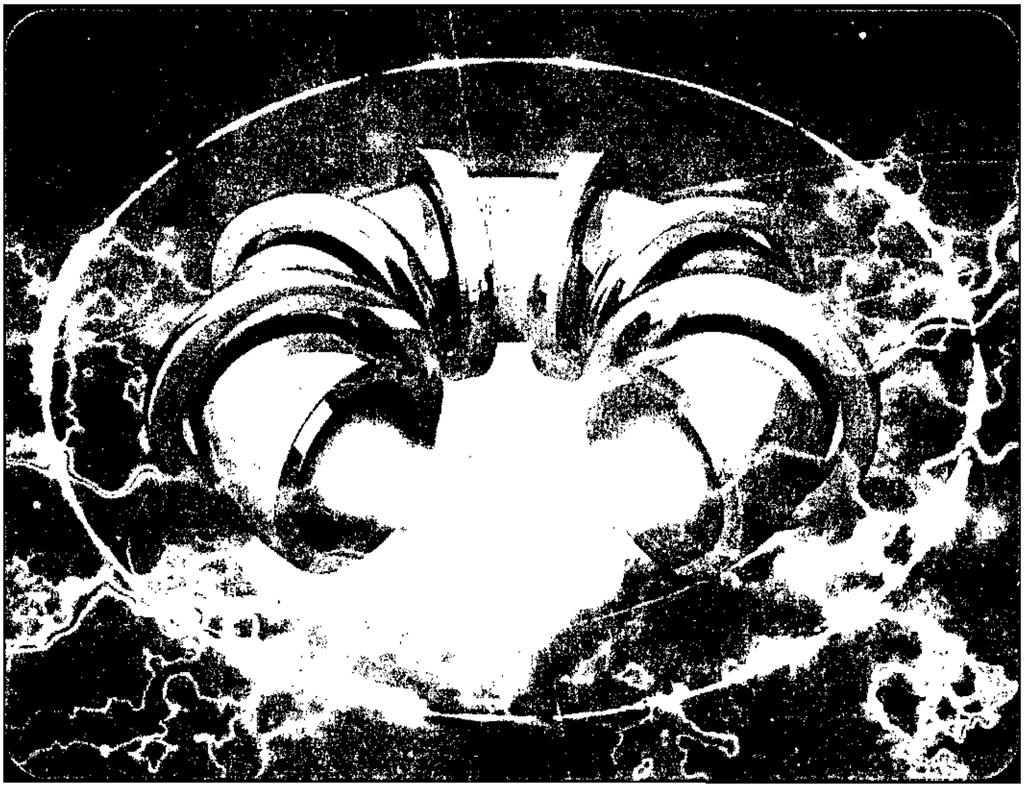
Certificate No.: 82210

03/05/2001

نبذة مختصرة عن
فيزياء البلازما وتطبيقاتها

نبذة مختصرة عن

فيزياء البلازما وتطبيقاتها



جمال جابر مصطفى العريجى

أستاذ مساعد بهيئة الطاقة الذرية

الناشر

المكتبة الاكاديمية

شركة مساهمة مصرية

٢٠١٢

رقـم الإيداع: ٢٠١٢/٣٢٤٧
ISBN: 978-977-281-484-0

حقوق النشر

الطبعة الأولى ٢٠١٢م - ١٤٣٣هـ

المكتبـة الأكاديميـة

شركة مساهمة مصرية

راس المال المصدر والمدفوع ١٨,٢٨٥,٠٠٠ جنيه مصرى

١٢١ شارع التحرير - الدقى - الجيزة

القاهرة - جمهورية مصر العربية

تليفون : ٣٧٤٨٥٢٨٢ - ٣٣٣٦٨٢٨٨ (٢٠٢)

فاكس : ٣٧٤٩١٨٩٠ (٢٠٢)

هذه السلسلة

تعد استجابة منطقية لما لقيته شقيقتها الكبرى "كراسات مستقبلية" التى بدأ ظهور أعدادها الأولى عام ١٩٩٧، من الترحاب والتشجيع، المقرونين بالدعوة إلى زيادة مساحة العلم فى إصدارات السلسلة إلى أقصى حد ممكن.

لقد دفعتنا هذه الدعوة إلى التفكير فى أن نفرد للموضوعات العلمية سلسلة خاصة، تستحقها، فكانت هذه السلسلة، التى تمثل تطويراً وتوسعاً فى أحد محاور "كراسات مستقبلية"، حيث ذكر فى مقدمتها ما نصه:

"الإلمام بمنجزات الثورة العلمية والتكنولوجية، التى تعد قوة الدفع الرئيسية فى تشكيل العالم، مع استيعاب تفاعلها مع الجديد فى العلوم الاجتماعية والإنسانية، من منطلق الإيمان بوحدة المعرفة".

ومن ملامح هذه السلسلة:

* المحافظة – على شكل المقال التفصيلى الطويل (Monograph) الذى تتميز به الكراسات عادة.
* الحرص على تقديم الاتجاهات والأفكار العلمية الجديدة، بجانب تقديم المعارف الخاصة بمختلف المجالات الحديثة، بشكل يسمح للقارىء "المتعلم غير المتخصص"، الذى يمثل القارىء المستهدف للكراسات، بالقدر الكافى من الإلمام والقدرة على المتابعة.
* وفى تقديمها للاتجاهات والمعارف العلمية الحديثة، لن تتبنى الكراسات الشكل النمطى لتبسيط العلوم، الذى يستهدف النجاح فى إضافة كمية –قلت أو كثرت– لبعض المعارف العلمية إلى ثقافة المتلقى. إننا لانتعامل مع العلم كإضافة، ولكن كمكون عضوى أصيل للثقافة المعاصرة، وهو مكون ثرى، يتضمن المناهج والمعلومات والأفكار والاتجاهات.
* وتأكيداً لعدم النمطية، ستتسع السلسلة للتأليف والترجمة والعرض، وتتضمن اجتهادات التبسيط والاستشراف، وستنطلق من أهمية تضامن المعرفة والحكمة وارتباط العلم الحديث بالتكنولوجيا Technoscience، مع التركيز على أهمية ارتباطهما معا بالأخلاق.

وبعد، فإننى أتقدم بالشكر إلى كل الزملاء الذين تحمسوا للفكرة، وساهموا فى تقديم المادة العلمية للسلسلة. وباسمهم وباسمى أشكر الصديق العزيز الأستاذ أحمد أمين، الناشر المثقف الذى احتفى من قبل بسلسلة "كراسات مستقبلية"، وشجعنا على إصدار هذه السلسلة الجديدة. والله الموفق.

هذه الكراسة

تحقق أحد أهداف سلسلة "كراسات علمية"، والمتمثلة فى معالجة موضوعات، ليست شائعة فى المكتبة العربية بشكل كافٍ. وكما يذكر المؤلف، الدكتور جمال العريجى، الأستاذ المساعد بهيئة الطاقة الذرية، فإن الهدف الرئيسى من هذا العمل هو "تقديم بعض المادىء والتطبيقات الأساسية لفيزياء البلازما، ذات درجة الحرارة العالية". وبطبيعة العمل وتخصصه، نرجو أن يغير طلاب المرحلة الجامعية والباحثين والتطبيقيين، وكذلك القارىء الجاد الحريص على متابعة وفهم التقدم العلمي والتكنولوجى إن تطور فيزياء البلازما أدى، كما يتضح من هذا العمل، إلى العديد من التطبيقات الهامة، الخاصة بالإنصهار النووى وبلازما الفضاء والفيزياء الغاية ومعالجة المواد بالبلازما، وحديث طب البلازما. ولاشك أن فهم الأساس العلمى لهذه التطبيقات، والآفاق المستقبلية لها، يوضحان أهمية هذا العمل الذى نضعه بين يدى المهتمين.

د. أحمد شوقى

يناير ٢٠١٢

تمهيد

فيزياء البلازما هي فرع جديد نسبيًا من الفيزياء، التي أصبحت ناضجة خلال النصف الأخير من القرن العشرين، وهو يبنى على المجالات الأساسية للفيزياء الكلاسيكية: الميكانيكا والديناميكا الكهربائية، والميكانيكا الإحصائية، والنظرية الحركية للغازات، وميكانيكا الموائع.

زيادة فهم فيزياء البلازما تساعد على التقدم في تطوير عديد من التطبيقات الهامة، على سبيل المثال، حصر البلازما مغناطيسيًا أو بالقصور الذاتي لتحقيق الانصهار النووي وبلازما الفضاء والفيزياء الفلكية، ومعالجة المواد بالبلازما، وتوليد الإشعاع المترادف (عادة عبر تسريع أشعة الإلكترونات أو الأيونات) وحديثا طب البلازما. وهكذا، تطورت فيزياء البلازما في جزء كبير، كفرع من الفيزياء التطبيقية أو الهندسية.

البلازما الناتجة عن تأين الغازات المحايدة تتضمن عادة أعدادًا متساوية من حوامل الشحنات الموجبة والسالبة. في هذه الحالة، الموائع ذات الشحنات الموجبة تقترن بقوة مع الأخرى السالبة وتؤدي إلى التعادلية الكهربية على مقاييس الطول المرئية، وتسمى هذه البلازما شبه محايدة.

البلازما غير المحايدة هي التي تحتوي على نوع واحد من الشحنات، وتنتج معمليًا ويعتمد توازنها على وجود المجالات المغناطيسية المكثفة.

الجدير بالملاحظة أن ٩٩% من المحتوى الباريوني للكون يتكون من بلازما، في العصور الأولى من الكون، كان كل شيء البلازما، أما في عصرنا الحالي، تملأ البلازما النجوم والسديم، وحتى الفضاء بين النجوم. وأيضًا تتخلل البلازما النظام الشمسي في صورة الرياح الشمسية والأرض محاطة تماما بمصيدة من البلازما داخل مجالها المغناطيسي.

والهدف الرئيسي من هذا الكتاب هو تقديم بعض المبادئ والتطبيقات الأساسية لفيزياء البلازما. وينصب التركيز على ما يسمى عادة فيزياء البلازما، ذات درجة الحرارة العالية في البلازما، التي هي الجسيمات المؤينة تقريبًا بشكل كامل ومحايد، والتي لها آثار صغيرة على سلوك البلازما. ويهدف المستوى إلى أنتكون مناسبة لطلاب المرحلة الجامعية والباحثين في

مجال علم البلازما، وآمل أيضا أن يكون مرجعا مفيدا للعلماء والمهندسين العاملين في الميادين ذات الصلة.

يتناول الكتاب عدة فصول: في الفصل الأول مقدمة في علم البلازما، حيث يتم شرح بعض المفاهيم الأساسية للبلازما وخصائصها، والفصل الثاني حركة الجسيمات المشحونة في البلازما موضحا فيه المرايا المغناطيسية وحزام إشعاع فان ألن والمجال المغناطيسي الأرضي، والفصل الثالث الهيدروديناميكا (الموائع المتحركة) موضحًا المعادلات الأساسية لديناميكا الموائع والمعادلات الأساسية لموجة الصدمة ومعادلة الحركة للمائع ومولدات الهيدروديناميكا المغناطيسية، الفصل الرابع الموجات الكهرومغناطيسية في البلازما موضحًا انتشار الموجات الكهرومغناطيسية في العوازل، وتذبذبات البلازما وأمواج الأيونات في البلازما وموجات ألفين. الفصل الخامس الاندماج النووي، ويتضمن آلية الاندماج والاندماج في الشمس خطوة بخطوة والتوكاماك واستيللاريتور والأيتر، والاندماج بحصر القصور الذاتي والقبص ذات المجال المنقلب والفرق بين الانشطار النووي والاندماج النووي، الفصل السادس يتناول بعض تطبيقات البلازما مثل طب البلازما وتعقيم الأنسجة الحية الحيوانية والبشرية، وأمثلة لعمليات البلازما مثل مقصات البلازما وجهاز الدفع الصاروخي وبلازما كلاستر.

سبتمبر ٢٠١٢
جمال جابر مصطفى العريجي
أستاذ مساعد بهيئة الطاقة الذرية
مركز البحوث النووية – البلازما والاندماج النووي
elaragi@gmail.com

المحتــويات

الفصل الأول
مقدمة في علم البلازما

مقدمة

عند تفريغ الدم من الكريات المختلفة (كرات الدم الحمراء والبيضاء والصفائح الدموية) لا يزال هناك سائل شفاف، والذي سمى بلازما (التي تعني "جيلـــي") من قبل العالم الطبيب التشيكي، يوهانس بركينيي (١٧٨٧-١٨٦٩). اســتخدم هذا المصطلح، لأول مرة، من قبل عالم الكيمياء الأميركي لانجميور الحــائز على جائزة نوبل لوصف الغاز المتأين في عام ١٩٢٧. نظرًا للتشابه القريب جدا ببلازما الدم، يحمل المائع المــؤين الإلكترونـــات والأيونـــات. فحـص لانجميور، جنبا إلى جنب مع زميله تونكس، فيزياء وكيمياء فتيلـــة تنجـستن المصابيح الكهربائية؛ بهدف إيجاد وسيلة لإطالة عمر الفتيلة (وهــو الهـدف الذي تتحقق معه في نهاية المطاف). في هذه العملية، تطورت نظرية بلازما الأغماد، وهي الطبقات المتاخمة بين البلازما المتأينـــة والـــسطوح الـــصلبة. اكتشف أيضًا أن بعض المناطق من أنبوب تفريغ البلازما تظهــر تغيــرات دورية في كثافة الإلكترونات، والتي تعرف في الوقــت الحاضــر بموجـــات لانجميور. وكان هذا هو نشأة فيزياء البلازما. ومن المثير للاهتمام أن أبحاث لانجميور في الوقت الحاضر تكون الأساس النظري لمعظم تقنيات المعالجـــة بالبلازما لإنتاج الدوائر المتكاملة. بعد لانجميور، انتشرت تـــدريجيًا بحـــوث البلازما في اتجاهات أخرى، منها خمس تكتسب أهمية خاصة.

أولا، أدى تطور البث الإذاعي إلى اكتشاف أيونوسفير الأرض، وطبقة مـــن الغاز المؤين جزئيًا في الغلاف الجوي العلوي، الذي يعكس موجات الراديو، ويكون مسؤولا عن تلقى إشارات الراديو، عندما يكون الإرسال في الأفـــق. لسوء الحظ، في بعض الأحيان يمتص ويشوه أيضًا الغلاف الجـــوي المتـــأين موجات الراديو. على سبيل المثال، المجال المغناطيـــسي لـــلأرض يـــسبب للموجات مختلفة الاستقطابات (بالنسبة لاتجاه المجال المغناطيسي) أن تنـــشر بسرعات مختلفة، وهو التأثير الذي يمكن أن يؤدي إلى "إشـــارات ظـــل" (أي

الإشارات التي تصل قليلا من قبل، أو قليلا بعد، الإشارة الرئيسية). من أجل فهم وربما تصحيح بعض أوجه القصور في مجال الاتصالات اللاسلكية. وضع علماء كثيرون مثل أبليتون وبودن كغ، منهجية متطورة لنظرية الموجات الكهرومغناطيسية، خلال أنظمة البلازما غير المنتظمة الممغنطة.

ثانيا، أدرك علماء الفيزياء الفلكية ان معظم الكون يتكون من البلازما، وبالتالي لكي يتم التوصل إلى فهم أفضل للظواهر الفيزيائية الفلكية، فإن الأمر يتطلب فهمًا أفضل لفيزياء البلازما. وكان من أبرز رواد هذا المجال العالم هانز الفين، الذي طور عام ١٩٤٠ نظرية ديناميكا الموائع الممغنطة، أو MHD؛ حيث يتم تعامل البلازما على أساس مائع موصل. وهذه النظرية استخدمت على نطاق واسع وبنجاح؛ لفحص البقع الشمسية، الانفجارات الشمسية، والرياح الشمسية، وتكوين النجوم، ومجموعة كبيرة من المواضيع الأخرى ذات الصلة بالفيزياء الفلكية. ومن المواضيع ذات الأهمية في نظرية MHD إعادة الارتباط المغناطيسي ونظرية الدينامو. إعادة الارتباط المغناطيسي هو العملية، التي من خلالها تغير فجأة طوبولوجيا خطوط المجال المغناطيسي؛ لتؤدي إلى التحول المفاجئ لقدر كبير من الطاقة المغناطيسية إلى طاقة حرارية، فضلاً عن تعجيل بعض الجسيمات المشحونة إلى طاقات عالية للغاية، ويعتقد عموما أنها الآلية الأساسية وراء الانفجارات الشمسية. تدرس نظرية دينامو تدرس كيفية حركة المائع MHD؛ لتؤدي إلى توليد مجال مغناطيسي عيني (ماكروسكوبي). وهذه العملية مهم جدًا؛ لأنه على حد سواء في المجالات المغناطيسية الأرضية والشمسية التي تضمحل بسرعة. ويحتفظ المجال المغناطيسي للأرض من قبل حركة باطنها المنصهر، والذي يمكن أن يعامل بوصفه مائعًا MHD كتقريب معقول.

ثالثا، إنشاء القنبلة الهيدروجينية في عام ١٩٥٢ أحدث قدرًا كبيرًا من الاهتمام في الاندماج النووى الحرارى، كمصدر ممكن للطاقة في المستقبل. في البداية تمت هذه الدراسة التي كانت تجري سرًا، وبشكل مستقل، من قبل الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي وبريطانيا العظمى. ومع ذلك كانت أول أبحاث الاندماج النووي الحراري، التي رفعت عنها السرية في عام ١٩٥٨، مما أدي إلى نشر عدد من الأوراق المهمة والمؤثرة جدًا في أواخر ١٩٥٠ وأوائل عام ١٩٦٠. بشكل عام، ظهرت لأول مرة فيزياء البلازما النظرية كتخصص رياضي دقيق في هذه السنوات. وليس مستغربًا أن معظم فيزيائي الاندماج

النووي مهتمون بفهم كيفية حصر البلازما الحرارية. يتم حصر معظم الحالات عن طريق المجالات المغناطيسية، وفحص عديد من حالات عدم استقرار البلازما، التي قد تسمح لها الهرب.

رابعا، اكتشاف چيمس ڤان ألن في عام ١٩٥٨ أحزمة من الإشعاع محيطة بالأرض، تعرف باسم ڤان ألن، وذلك باستخدام البيانات المرسلة من مستكشف القمر الصناعي بالولايات المتحدة؛ مما فتح المجال لفيزياء بلازما الفضاء. اقتبس علماء الفضاء نظرية حصر البلازما بالمجال المغناطيسي من بحوث الاندماج، ونظرية موجات البلازما من فيزياء الغلاف الأيوني، وفكرة إعادة الربط المغنطيسي كآلية لإطلاق الطاقة، وتعجيل الجسيمات من الفيزياء الفلكية.

أخيرًا، تطوير أنظمة الليزر عالية الطاقة في عام ١٩٦٠ فتحت مجال فيزياء الليزر البلازما. عندما يضرب شعاع الليزر عالي الطاقة هدفًا صلبًا على الفور، تستأصل المادة من الهدف، وتتكون البلازما على الحدود المتاخمة لمادة الهدف (بين الهدف والحزمة الإشعاعية). الليزر بلازما لها خصائص، لا توجد في البلازما التقليدية. من أهم تطبيقات فيزياء الليزر البلازما، هو نهج الطاقة الاندماج المعروف بحصر القصور الذاتي. في هذا النهج، وتستخدم أشعة الليزر بتركيز عالٍ، وبشكل محكم لتسخين وانضغاط الطبقة الخارجية لمادة الهدف؛ حتى يتم تحقيق الكثافة ودرجات الحرارة التي هي سمات الاندماج النووي (أي مركز من القنبلة الهيدروجينية). هناك تطبيق آخر لفيزياء ليزر البلازما، هو استخدام مجالات كهربائية قوية للغاية، عند مرور نبضة ليزر ذات شدة عالية عبر البلازما لتعجيل الجسيمات. يأمل فيزيائيو الطاقة العالية في استخدام تقنيات تعجيل البلازما إلى حد، يقلل من حجم وتكلفة معجلات الجسيمات.

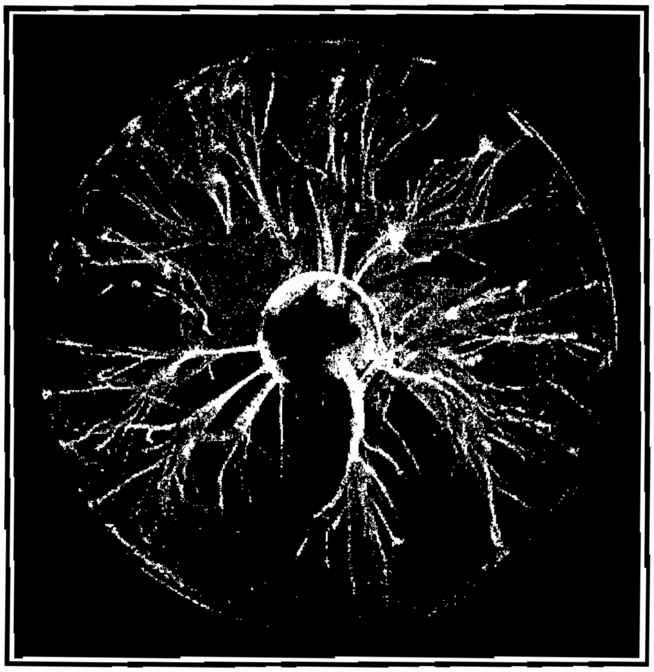
في الأزمنة القديمة كان يعتقد أن العالم مكون من أربعة عناصر أساسية، هي: التربة –الماء – الهواء والنار؛ حيث تمثل التربة الحالة الصلبة والماء الحالة السائلة والهواء الحالة الغازية للمادة، وتناظر البلازما العنصر الرابع، وهو النار الذي يظهر الحالة الغالبة على المستوى الكوني. وبالتالي البلازما هي حالة متميزة من حالات المادة، يمكن وصفها بأنها غاز متأين تكون فيه

الإلكترونات حرة، وغير مرتبطة بالذرة أو بالجزئ. فإذا علمنا أن المادة توجد في الطبيعة في ثلاث حالات: صلبة وسائلة وغازية، فإنه بالإمكان تصنيف البلازما على أنها الحالة الرابعة، التي يمكن أن توجد عليها المادة.

البلازما تخضع لقوانين الغازات، وفي حالات متعددة تسلك البلازما سلوك الغازات. على النقيض من الغازات فإن للبلازما صفاتها الخاصة، ويؤدي التأين لخروج واحد أو أكثر من الإلكترونات عند تسليط حرارة أو طاقة معينة. هذه الشحنة الكهربية تجعل البلازما موصلة للكهرباء؛ ولذلك ستستجيب بقوة للمجال الكهرومغناطيسي.

تكون حركة الجسيمات في الغاز العادي محدودة فقط بالتصادمات مع بعضها البعض، أو مع الجدران، أما حركة الجسيمات في البلازما، فإنها تكون مقيدة بالمجال المغناطيسي، ويمكن احتواء البلازما بجدران مغناطيسية تعمل كمصايد مغناطيسية. في وجود المجال المغناطيسي القوي، تقيد الجسيمات بدوائر حول خطوط قوى المجال، على الرغم من تحركها بحرية على طول خطوط المجال، وتكون محصلة الحركة الحرة للجسيمات حلزونية. إذا أجبرت جسيمات البلازما لتتحرك عبر خطوط المجال؛ فإنها تنزلق على خطوط المجال. يمكن القول بأن جسيمات البلازما تلتصق بخطوط المجال، أو أن المجال المغناطيسي يتجمد بالبلازما في حالة البلازما الساخنة؛ حيث تمرر جسيمات البلازما الساخنة كل منهما الآخر بأقل تداخل. فمن المعلوم أن البلازما الساخنة تتميز بتوصيلية عالية جدا، وبالتالي تقريبا المقاومة ضعيفة جدًا لمرور التيار الكهربي خلالها. وعلى الجانب الآخر، نجد أن البلازما الباردة تتميز بتوصيلية أقل، وبالتالي تسمح التفاعلات بين الجسيمات نتيجة للتصادمات بتسرب المجال المغناطيسي خلال البلازما. تبلغ درجة حرارة البلازما الباردة عديدًا من الألكترون فولت (حيث ١ الكترون فولت يساوي ١١٦٠٠ درجة كلفن) أما البلازما الساخنة، فإن درجة حرارتها تصل عديدًا من المئات الإلكترون فولت أي تقريبا مليون درجة كلفن. في عام ١٨٧٩، اكتشف العالم السير وليام كروكس البلازما عن طريق أنبوب كروكس، وأطلق عليها آنذاك "المادة الإشعاعية" (شكل ١). واكتشف العالم البريطاني جوزيف

طومسون خصائص وطبيعة البلازما عام ١٨٩٧. ويرجع الفضل في تسمية البلازما إلى العالم لانغموير في عام ١٩٢٨؛ ربما لأنه رأى أنها تشبه بلازما الدم.



شكل (١): لمبة بلازما توضح إحدى ظواهر البلازما الأكثر تعقيدًا، والتي من ضمنها الفتائل.

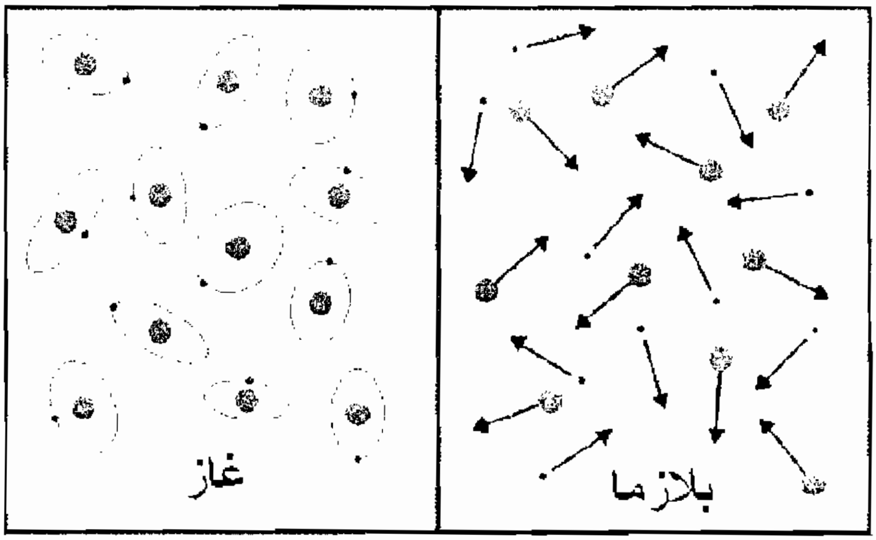
يعتبر التفريغ الكهربي من أقدم فروع المعرفة في العلوم الطبيعية؛ حيث استخدم العالم لانغموير اصطلاحًا خاصًّا للغازات المتأينة، وهو البلازما التي تعتمد على درجة التأين للغاز. أما في إطار علم الكونيات، تعتبر البلازما هي أصل الكون، وهي الحالة المتغلبة على بقية الحالات الأخرى للمادة (الصلبة والسائلة والغازية).

البلازما هي حالة متميزة من حالات المادة، يمكن وصفها بأنها غاز متأين تكون فيه الإلكترونات حرة وغير مرتبطة بالذرة أو بالجزيء. فإذا علمنا أن المادة توجد في الطبيعة في ثلاث حالات: صلبة وسائلة وغازية، فإنه بالإمكان تصنيف البلازما على أنها الحالة الرابعة، التي يمكن أن توجد عليها المادة (شكل ٢).



شكل (٢): الأطوار الانتقالية المختلفة للمادة.

ويوضح الشكل (٢) الأطوار الانتقالية المختلفة للمادة، عند إضافة حرارة (كمثال الطاقة الكهربية). عند درجات الحرارة المنخفضة، تكون المادة في حالة صلبة، وبارتفاع درجات الحرارة تتحول إلى الحالة السائلة، وبارتفاع الحرارة تتحول إلى الحالة الغازية، وبزيادة الحرارة يتحول الغاز إلى بلازما (غاز متأين). ويوضح الشكل (٣) الفرق بين الحالة الغازية والبلازما عند تسليط الطاقة على ذرات الغاز ناحية اليسار تتحول إلى بلازما – خليط من الأيونات الموجبة (النقاط الحمراء)، والإلكترونات السالبة (النقاط السوداء) ناحية اليمين. هذا الخليط يسمى بالغاز المتأين أو البلازما Plasma، وحيث إن البلازما حالة غير مستقرة، فإن قوة التجاذب الكهربية تعمل على إعادة اتحاد الشحنات الموجبة والسالبة مع بعضها البعض، وتكون نتيجة إعادة الاتحاد هو انطلاق ضوء، ذي تردد معين يعتمد على مستويات الطاقة للذرات المكونة لمادة البلازما.



شكل (٣): الفرق بين الحالة الغازية والبلازما.

على النقيض من الغازات، فإن للبلازما صفاتها الخاصة. يؤدي التأين إلى خروج واحد أو أكثر من الإلكترونات، عند تسليط حرارة أو طاقة معينة (كهربية أو موجات كهرومغناطيسية). هذه الشحنة الكهربية تجعل البلازما موصلة للكهرباء؛ ولذلك تستجيب بقوة للمجال الكهرومغناطيسي. تأخذ البلازما شكل غاز متعادل أو شبه متعادل (أعداد متساوية من الأيونات موجبة الشحنة، وإلكترونات سالبة الشحنة)، على سبيل المثال النجوم والتفريغ الوهاج الجوي، ينتج عنه تخليق بلازما بسبب المجالات الكهربية الهائلة الموجودة. وينتج عن ذلك حرارة هائلة ينتج عنها موجات الصدمة. وتنتج موجات الصدمة بحركة الجسيمات خلال الغاز بسرعات تتعدى سرعة الصوت. على سبيل المثال، تسير الشهب والنيازك القادمة إلى الغلاف الجوي للأرض بمعدل ١٠ كيلومترات لكل ثانية هذه السرعة كافية لضغط الغاز الموجود في مقدمتها، وهذا يؤدي إلى ارتفاع كثافة الغاز بدرجة عالية جدًّا، وينتج عن ذلك تحويل جزء من طاقة حركة الجسم (الشهب أو النيازك) إلى طاقة حرارية؛ لإثارة جزيئات الغاز في منطقة الصدمة. ويمكن القول بأن جزيئات الغاز تكتسب الطاقة من خلال طاقة الانتقال العلية من الأجسام؛ وتبعًا لذلك يتحول جزء من هذه الطاقة إلى إثارة المستويات الدورانية للجزيئات. في النهاية انحلال الجزيئات وتأينها، سوف تأخذ هذه الجزئيات مكانها إذا أصبحت الصدمة فعالة

بدرجة كافية. في طبقات الغلاف الجوي العليا، تحتفظ البلازما بحالتها؛ نظرًا لوجود الأشعة الشمسية القادمة من الشمس، والإشعاعات الأخرى القادمة من الفضاء الخارجي، وتكون البلازما في الأيونوسفير عند درجة حرارة ١٠٠٠ كلفن، وعند ارتفاع ٦٠ كيلومترًا، وتكون كثافة الإلكترونات في المدى ١٠ ٤ – ١٠ ٧ سم⁻٣، والميكانيكية التي تعمل على حفظ هذا المستوى من كثافة البلازما هي ظاهرة التأين الضوئي؛ حيث تمتص الذرات الفوتونات، وتتحرر الطاقة التي تؤدي إلى بذل الشغل المطلوب لإزالة الإلكترونات من الذرات. تسلك البلازما السلوك الجماعي؛ فإذا وجد فرق في الكثافة؛ أي هناك منطقة ذات كثافة عالية وأخرى منخفضة، فإن هذا الفرق يتسبب في توليد مجال كهربي، يؤدي إلى انجراف البلازما.. ونتيجة لحركة الشحنات يتولد تيار كهربي، وبالتالي يتولد مجال مغناطيسي. ونتيجة لتوليد المجالين الكهربي والمغناطيسي، فإنهما يؤثران على حركة الجسيمات المشحونة الأخرى.

معادلة سها Saha

الجزء المتأين من الغاز في حالة الاتزان الحراري يعطى بالعلاقة:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/k_B T} \qquad (1.1)$$

حيث n_i كثافة الذرات المتأينة

n_n كثافة الذرات المتعادلة

T درجة الحرارة

k_B ثابت بولتزمان

U_i جهد التأين

كثافة الذرات المتعادلة وجهد التأين للهواء عند درجة حرارة الغرفة

$n_n \approx 3\times10^{25}\text{m}^{-3}$, $T \approx 300\text{K}$, $U_i = 14.5\text{eV}$ $(1\text{eV} \approx 1.6\times10^{-19}\text{J})$

$$\Rightarrow \frac{n_i}{n_n} \approx 10^{-122}$$

هذه النسبة على الأرض نادرًا ما تكون المادة في حالة بلازما

إنتاج البلازما

لكي يتم تحويل الغاز إلى بلازما، لابد من انتزاع الإلكترون أو أكثر من ذرات الغاز، وبالتالي تتحول الذرات إلى أيونات موجبة وإلكترونات وتعرف هذه العملية باسم التأين.

ويمكن الحصول على عملية التأين بطرق متعددة ومن أهم هذه الطرق:

١ – التأين بالحرارة

تصبح معظم المواد في حالة تأين، إذا ماتم تسخينها إلي درجة حرارة عالية، وهذه العملية تعرف بالتأين الحراري وتعتمد طاقة التأين للذرات على ترتيب العناصر في الجدول الدوري، فمثلاً العناصر الثقيلة نجد من السهل تأينها؛ لأن طاقة الترابط لإلكترونات ذراتها ضعيفة (مثل: الصوديوم – الليثيوم – البوتاسيوم – السيزيوم – إلخ)، وغالبًا ما تستخدم هذه العناصر في الحصول على البلازما الحرارية في المعامل. أما عن الغازات الخاملة (مثل: الهليوم والنيون والأرجون ... إلخ) فنجد أن إلكترونات الترابط لها متينة ويصعب اضطرابها. ولكي نحصل على البلازما بالتاين الحراري، فمن الضروري أن تصل درجة الحرارة عشرات الألف من الدرجات؛ فمثلاً في الطبيعة نجد أن النجوم تتكون من بلازما حرارية.

٢ – التأين بالإشعاع

التأين بالإشعاع يحتل مكانة ذات أهمية في الفيزياء الفلكية؛ حيث تسبب الأشعة فوق البنفسجية القادمة من النجوم في تأين أبخرة الغازات المحيطة بها والغازات البينية بين النجوم، وتعمل الأشعة الشمسية أيضًا على تأين الطبقات الخارجية للغلاف الجوي للأرض. أما عن التأين بالإشعاع في تكنولوجيا البلازما، فإنه ليس ناجحًا بدرجة كافية؛ نظرًا لعملية الاتحاد بين الإلكترونات وتكون الأيونات سريعة محققة شرط الاتزان.

٣ – التأين بالتفريغ الكهربي

يعتبر التأين بالتفريغ الكهربي هو العملية الأكثر شيوعًا في مختبرات، وتكنولوجيا البلازما أيضا تحدث التأين بالتفريغ الكهربي في الطبيعة، ومثال على ذلك البرق. تفريغ البرق للكهرباء يكون عادة ٣٠٠٠٠ أمبير، ويصل إلى ١٠٠ مليون فولت. يصدر منه الضوء وأشعة الراديو وأشعة سينية وحتى أشعة جاما. قد تصل درجة حرارة البلازما بالبرق إلى ٢٨٠٠٠ كالفن وقد تتعدى كثافة الإلكترون $١٠^{٢٤}$/متر^{٣}، أما التأين بالتفريغ الكهربي في تكنولوجيا

البلازما، فإننا نجده ملموسًا في أنابيب الليزر الغازي، مثل: الهليوم – نيون ليزر والقوس الكهربي ولمبات الفلوريسنت وغيرها. تعتمد عملية التأين بالتفريغ الكهربي على وجود مجال كهربي كبير، يعمل على وجود كثرة من الإلكترونات (أي زيادة سريعة جدًّا في أعداد الإلكترونات)؛ أي تحدث عملية تضعيف للإلكترونات في صورة متوالية هندسية.

هناك طرق أخرى متعددة في توليد البلازما، بالإضافة إلى الطرق السابقة، ولكنها أقل استخدامًا.. على سبيل المثال توليد البلازما بالحقن؛ حيث يتم حقن سيل من الأيونات، ذات سرعات عالية من معجل إلى مصيدة مغناطيسية؛ فتعمل الأيونات على جذب الإلكترونات من الوسط المحيط، ليكون بلازما ساخنة.

أشكال البلازما تتضمن

بلازما تصدر عن أجهزة صناعية

- موجودة بشاشات البلازما مثل التلفاز.
- مصابيح التألق (لمبات الفلوريسنت) (إنارة ذات طاقة ضعيفة)، إشارات النيون.
- عوادم الصواريخ.
- النطاق الموجود أمام الحاجز الحرارى لسفن الفضاء خلال دخولها غلاف الأرض الجوي.
- داخل هالة مولد تفريغ الأوزون.
- أبحاث الاندماج النووي.
- التقوس الكهربي الموجود بالإنارة القوسية، لحام القوس الكهربي أو المصباح (المدفع) البلازمي.
- مصابيح البلازما وتسمى كرة البلازما.
- يستخدم البلازما لحفر رقائق الحاسوب لإنتاج الدوائر الكهربية وصنع أشباه الموصلات.

بلازما طبيعية أرضية

- البرق والصواعق.
- كرة اللهب .
- نار سانت إلمو .
- طبقة الأيونوسفير .
- الشفق القطبي.

بلازما طبيعية كونية : فيزياء فلكية وفضاء كوني

- الشمس والنجوم (البلازما تسخن بالاندماج النووي).
- رياح شمسية.
- الفراغ المحيط بين الكواكب.
- الفراغ المحيط بين النجوم.
- الفراغ المحيط بين المجرات.
- حلقة أحد أقمار المشتري
- الأقراص الناشئة من تكوين الأجسام النجمية الضخمة.
- سديم المجرات.

معايير البلازما

يعتبر وصف البلازما على أنها وسط متعادل من الجسيمات سالبة وموجبة الشحنة، وصفاً ضعيفاً يحتاج الى الدقة؛ لأن تعريف البلازما لابد أن يتضمن ثلاثة معايير؛ مما يعطى دقة أكثر، وهي:

١. **تقارب البلازما:** يجب أن تكون الجسيمات المشحونة متقاربة بدرجة أن لكل جسيم أن يؤثر على كثير من الجسيمات القريبة بدلاً من مجرد التفاعل مع أقرب الجسيمات (والسلوك الجماعي هو الصفة المميزة للبلازما). لتقارب البلازما تأثير أقوى، كلما كانت أعداد الإلكترونات داخل المجال المؤثر (يسمى كرة ديباي)، لها نصف قطر من الجسيمات الكبيرة يسمى (طول ديباي). معدل عدد الجسيمات بمجال ديباي هو قيمة أو مقدار البلازما ويرمز λ_D.

طول ديباي Debye

يعتبر طول ديباي من أهم البارامترات الفيزيقية لوصف البلازما؛ فهو يحقق المسافة، التي يشعر عندها الجسيم المشحون الفردي بتأثير المجال الكهربي للجسيمات المشحونة الأخرى، داخل البلازما. وهذه الجسيمات تقوم بترتيب نفسها لحجب الجهد الكهروستاتيكي، في حدود مسافة تعرف باسم طول ديباي λ_D. عند الأسطح الملامسة للبلازما (الجدران) تتكون طبقة، تعرف باسم غشاء البلازما، وسمك هذه الطبقة في حدود طول ديباي λ_D، وداخل هذه الطبقة تنعدم التعادلية الكهربية الماكروسكوبية، التي هي معيار البلازما. أما البلازما التي وراء هذه الطبقة، فإنها تحقق التعادلية الكهربية ويعطى طول ديباي بالعلاقة:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e q_e^2}} \qquad (1.2)$$

حيث:

ε. هي النفاذية خلال الفراغ.

k هو ثابت بولتزمان.

q_e هو مقدار الشحنة الإلكترونية.

T_e درجة حرارة الإلكترونات.

n_e كثافة الإلكترونات

ويمكن حساب λ_D مباشرة من العلاقة:

$$\lambda_D(cm) = 743\sqrt{T_e(ev)/n(cm^{-3})} \qquad (1.3)$$

أو

$$\lambda_D(m) = 69\sqrt{T_e(k^\circ)/n(m^{-3})} \qquad (1.4)$$

من هذه العلاقات يتضح ان طول ديباي يتناسب عكسيًا مع كثافة البلازما، فكلما زادت الكثافة في التفريغ الكهربي قل طول ديباي، ومثال ذلك: اذا كانت كثافة الإلكترونات $n_e = 10^{16} m^{-3}$، ودرجة الحرارة $T_e = 10^4 k^\circ$ نجد طول ديباي $\lambda_d \approx 10^{-4} m$؛ أى أنه صغير جدًا، ويبلغ طول ديباي عدة أمتار في البلازما الموجودة بين النجوم.

حجم التفاعلات في البلازما: حيث إن نصف قطر ديباي Debye صغير بالمقارنة بالحجم الطبيعي للبلازما الموجودة في الكون، وهذا يعنى أن مقدار التفاعلات الحادثة في قلب كتلة البلازما، لها أهمية كبيرة عنها على حواف البلازما، آخذين في الاعتبار تأثير ما يحيط بالبلازما من الوسط المحيط بها.

المقدار N_D يقيس متوسط عدد الإلكترونات، الموجودة داخل كرة ديباي، ونصف قطره يسمى طول ديبي داخل، ويعطى بالعلاقة:

$$N_D = \frac{4\pi}{3}\lambda_d^3 n_e \qquad (1.5)$$

أو

$$N_D = 1.38\times10^6 T^{1.5}(k^\circ) n_e^{-0.5}(m^{-3}) \qquad (1.6)$$

غشاء ديباي

غشاء ديباي (يعرف أيضًا بالغشاء الكهربائي الساكن (أو الإلكتروستاتيكي) عبارة عن طبقة من البلازما، لها كثافة كبيرة من الأيونات الموجبة، وبالتالي فلها شحنة موجبة فائضة، تقوم بخلق توازن مع شحنة سالبة مقابلة على سطح

مادة ما، تكون على تماس معها. تقدر سماكة هذه الطبقة بعدة وحدات من أطوال ديباي، تتغير قيمتها اعتمادًا على الخصائص المتعددة للبلازما، مثل: درجة الحرارة، والكثافة ... إلخ.

يتكون غشاء ديباي في البلازما؛ لأن الإلكترونات لديها عادة درجة حرارة مقاربة، أو حتى أكثر من التي للأيونات، بالإضافة إلى كونها أخف وزناً. وبالتالي، فإن للإلكترونات سرعة أكبر من الأيونات بمعامل على الأقل من درجة $\sqrt{m_i/m_e}$، وهذا يؤدي لأن تقوم الإلكترونات بالهروب من البلازما على السطح الفاصل للمادة، وبالتالي تشحن السطح بشحنة سالبة، بالمقارنة مع البلازما بحد ذاتها. ويعتمد بارامتر البلازما على كل من طول ديباي وكثافة البلازما ويرمز له Λ.

يمكن تلخيص مقدار Λ بالجدول التالي:

الوصف	مقدار قيمة البلازما	
	$\Lambda << 1$	$\Lambda >> 1$
الاقتران	البلازما مقترنة بقوة	اقتران البلازما ضعيف
كرة ديباي	تكتل خفيف ومتناثر	تكتل كثيف
التأثير الكهروستاتيكي	متواصل بشكل دائم	أحيانا
المميزات	بارد وكثيف	حار ومتناثر
أمثلة	بلازما الاستئصال بالجراحة عن طريق الليزر المكثف التفريغ القوسي البارد ذو الضغط العالي تجارب انصهار القصور الذاتي النجوم الصغيرة البيضاء/طبقات الجو للنجوم النيوترونية	طبيعة طبقة الأيونوسفير أجهزة الانصهار المغناطيسي بلازما الفضاء الخارجي كرة البلازما

الجدول يوضح أهم البارامترات لأنواع مختلفة من البلازما ت (الكونية والأرضية).

	$n(m^{-3})$	$T(eV)$	$\omega_p\ (sec^{-1})$	$\lambda_D\ (m)$	Λ
Interstellar	10^{6}	10^{-2}	$6x10^{4}$	0.7	$4x10^{6}$
Solar Chromosphere	10^{18}	2	$6x10^{10}$	$5x10^{-6}$	$2x10^{3}$
Solar wind (1 A U)	10^{7}	10	$2x10^{5}$	7	$5x10^{10}$
Ionosphere	10^{12}	0.1	$6x10^{7}$	$2x10^{-3}$	$1x10^{5}$
Arc discharge	10^{20}	1	$6x10^{11}$	$7x10^{-7}$	$5x10^{2}$
Tokamak	10^{20}	10^{4}	$6x10^{11}$	$7x10^{-5}$	$4x10^{8}$
Inertial Confinement	10^{28}	10^{4}	$6x10^{15}$	$7x10^{-9}$	$5x10^{4}$

٣. تردد البلازما:

من أهم خصائص البلازما هي استقرارية التعادلية الكهربية الماكروسكوبية. ولكن عند حدوث اضطراب لحظي للبلازما، يختل التوازن وتتولد مجالات كهربية داخلية، تؤدي إلى التحرك الجماعي للجسيمات، والتي تعمل على إعادة التعادلية إلى وضعها الأصلي. والتحرك الجماعي للجسيمات ماهو إلا ذبذبات ذات تردد، يعرف باسم تردد البلازما. وبسبب فرق الكتلة بين الأيونات والإلكترونات، فإن الإلكترونات تتذبذب جماعيًا حول الأيونات، وتتحقق قوة الاسترجاع الجماعية بقانون كولوم للتجاذب بين الأيونات والإلكترونات.

تردد الإلكترونات في البلازما هو كبير بالمقارنة بتردد الإلكترون، في حالته المتعادلة (ويقيس التردد البلازمي للإلكترون، ويسمى موجات البلازما أو موجات لانجموير تقيس كثافة الشحنة في محيط موصل، مثل: البلازما والمعادن. وينتج من الكمية في هذا التردد (البلازمون)، وهو شبه جزيء للبلازما) أكبر من تردد الإلكترون بالحالة الطبيعية (بقياس موجات التصادم بين الإلكترونات والجسيمات المحايدة). بهذه الحالة، تتصرف البلازما بحماية شحناتها بسرعة (شبه محايد هو تعريف آخر للبلازما).

الأرض منبع البلازما؛ حيث نرى أيونات الأكسجين والهيدروجين والهليوم تتدفق إلى الفضاء من مناطق قريبة من القطبين. يرمز اللون الأصفر الذي فوق القطب الشمالي إلى ضياع الغازات إلى الفضاء الخارجي. وترمز

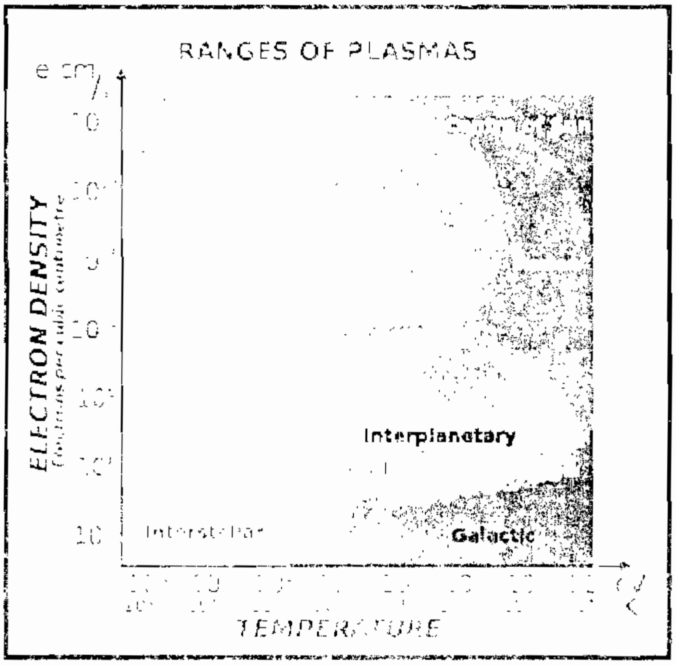
المنطقة الخضراء الى شفق القطب الشمالي، او طاقة البلازما، التي تتدفق عائدة الى الأرض.



شكل (٤): شفق القطب الشمالي.

نطاق بارامترات البلازما

تختلف قيم البلازما حسب الأبعاد، ولكن خصائص البلازما قد تكون متقاربة جداً، كما هو موجود بجدول مقاييس البلازما. الجدول التالي يبين فقط البلازما الذرية التقليدية فقط، وليست الظواهر الغريبة مثل بلازما الكواركات.



شكل (٥): نطاق البلازما من حيث كل من درجة الحرارة والكثافة.

مدى مجموعة من البلازما. تزداد الكثافة لأعلى، وزيادة درجة الحرارة نحو اليمين. ويمكن اعتبار الإلكترونات الحرة في المعادن مثل إلكترونات البلازما.

نطاق بارامترت البلازما		
[illegible]	البلازما الأرضية	البلازما الكونية
الحجم بالأمتار	10^{-6}متر (بلازما مختبرات) حتى 10^{2}متر (البرق)	10^{-6}متر (غلاف سفينة الفضاء) حتى 10^{25}متر (سديم المجرات)
الحياة بالثواني	10^{-12}ثانية (البلازما الليزرية) حتى 10^{7}ثانية (لمبات الفلورسنت)	10^{1}ثانية (الانفجارات الشمسية) حتى 10^{17} ثانية (بلازما المجرات)
الكثافة الجسيمات لكل متر مكعب	10^{7}حتى 10^{32} لكل متر مكعب (حصر البلازما العطالي)	1 ما بين (المجرات حتى 10^{30} m^{-3} باطن النجوم)
درجة الحرارة بالكالفن	0~كلفن (بلازما متبلورة غير متعادلة حتى 10^{8}كلفن (بلازما الاندماج المغناطيسي)	10^{2}كلفن (الشفق) حتى 10^{7}كلفن (باطن الشمس)
المجال المغناطيسي بالتسلا	10^{-4}تسلا (بلازما مختبرات) حتى 10^{3}تسلا (البلازما النبضية)	10^{-12}تسلا (ما بين المجرات) حتى 10^{11}تسلا (قرب النجوم النيوترونية)

درجة تأين البلازما

التأين ضروري لتكوين البلازما، والمقصود بـ"كثافة البلازما"، هي الكثافة الإلكترونية؛ بمعنى كمية الإلكترونات المتحررة لكل وحدة حجم. درجة التأين هي كمية الذرات التي خسرت (أو كسبت) إلكترونات، تكون الحرارة هي العامل القوي المتحكم بذلك. لو أن جزءاً من الغاز بما يساوي ١% من الجسيمات قد تأينت، فسوف يأخذ الغاز صفة البلازما (بمعنى أنه يتأثر بالمجال المغناطيسي، وهو التوصيلية الكهربائية العالية).

درجة التأين α تعرف بالمعادلة:

$$\alpha = \frac{n_i}{(n_i + n_a)} \qquad (1.7)$$

حيث إن: n_i كثافة الأيونات و n_a كثافة الذرات غير المتأينة (المحايدة).

ترتبط كثافة الإلكترون بدرجة التأين، عن طريق حالة متوسط الـشحنة $\langle Z\rangle$ للأيون خلال المعادلة التالية:

$n_e = \langle Z\rangle n_i$ حيث إن n_e ترمز إلى كثافة الإلكترونات.

تسمى البلازما مع درجة قليلة من التأين "بلازمـا بـاردة". ومـن الممكـن الحصول على بلازما بدرجة قليلة من التأين (أكثر الغازات المحايدة)؛ بمعنى أن الأيونات ذات درجة عالية من التأين، تكون الإلكترونات قليلة موجودة لكل أيون.

درجات الحرارة

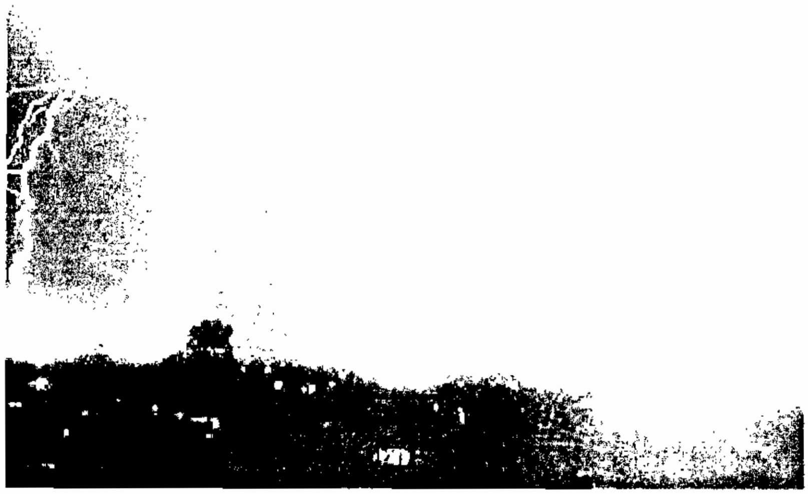
تقاس حرارة البلازما بالكلفن أو إلكترون فولت، وهي قياس للطاقة الحركـة الحرارية لكل جزيء. في كثير من الأحيان، تكون الإلكترونات قريبـةً مـن حالة التوازن الحراري؛ لأن الحرارة تكون واضحة المعـالم. حتـى بحالـة الانحراف في معادلات ماكسويل لتوزيع الطاقة، ومثل: أشعة فوق البنفسجية، والجسيمات النشطة، أو مجال كهربائي قوي. وبسبب التفاوت الكبير بالحجم، تأتي الإلكترونات إلى حالة التوازن ديناميكا الحرارية بأنفسها، أسرع مـن أن يتحولوا إليها، من خلال الأيون أو الذرات الطبيعية. لهذا السبب تكون حرارة الأيونات مختلفة عن حرارة الإلكترون، وعادة أبرد. وهـذا معتـاد ببلازمـا الأيونات الضعيفة؛ حيث تكون الأيونات قريبة من الحرارة المحيطة.

استناداً إلى الحرارة المرتبطة بالإلكترونات والأيونات والجسيمات المحايـدة، فإن البلازما يمكن تصنيفها على أنها حرارية أو لاحرارية.

- **البلازما الحرارية:** تكون فيها الإلكترونات والأجسام الثقيلة بنفس بدرجـة الحرارة نفسها؛ أي إنها بحالة التوازن الحراري مع بعضها البعض..
- **البلازما اللاحرارية:** تكون الأيونات والجسيمات المحايدة بحالة الحـرارة المحيطة بها، بينما تكون الإلكترونات أكثر حرارة بكثير.

وكما أسلفنا، فإن الحرارة تتحكم بدرجة التأين بالبلازما؛ خاصـة وأن تـأين البلازما محدد بدرجة حرارة الإلكترون المتصلة بطاقـة التـأين (وبدرجـة أضعف بالكثافة). وأحياناً يشار إلى البلازما بأنها حـارة، إذا كانـت متأينـة بدرجة تامة، أو باردة إذا كان جزئ بسيط (كمثال ١%) من جـزيء الغـاز متأيناً، ولكن التعريفات الأخرى للبلازما الحارة والباردة هي معروفة. حتـى

في حالة البلازما الباردة، فإن درجة حرارة الإلكترون المثالية، تكون حـــوالي عدة آلاف من الدرجات المئوية. عادة ما تكون البلازمـــا المـــستخدمة فـــي التكنولوجيا بلازمية باردة في هذا الصدد.



شكل (٦): البرق كمثال للبلازما الموجودة على سطح الأرض.

تفريغ البرق للكهرباء يكون تيارًا تصل شدته عادة إلى 30 كيلو أمبير، ويصل جهد التفريغ إلى 100 مليون ڤولت. يصدر منها الضوء وأشعة الراديو وأشعة سينية وحتى أشعة جاما. قد تصل درجة حرارة البلازمـــا بـــالبرق ~ 28000 كلفن. وقد تتعدى كثافة الإلكترون $10^{24}\ m^{-3}$.

الجهد الكهربائي

بما أن البلازما موصل قوي للكهرباء، فإن مقادير الجهد الكهربية ستأخذ دورًا مهمًا. وبما أن الجهد موجود ما بين جسيمين مشحونين بالفضاء، فإذا وضـــع الكترود أو قطب كهربي بالبلازما؛ فإن الجهد بشكل عام سيتحرك بقوة إلـــى مادون جهد البلازما؛ بسبب نشوء ما يسمى غشاء ديبـــاي. وبـــسبب جـــودة التوصيل الكهربي، فإن المجال الكهربي للبلازما يصبح صغيرًا جدًا، وهـــذا يفضي الى مفهوم مهم لشبه الحياد، والذي يقول إذا كانـــت كميـــة التقـــارب الحقيقية جيدة. فالمفروض أن كثافة الشحنات السالبة تعادل كثافـــة الـــشحنات

الموجبة خلال مساحة كبيرة من البلازما؛ حيث إن المعادلة: ($n_e = \langle Z \rangle n_i$) على مقياس طول ديباي قد يكون الشحن فيها غير متوازن. بهذه الحالة الخاصة، تكون الطبقات المزدوجة متشكلة، ويمكن توزيع الشحن أن يمتد إلى عشرات من أطوال ديباي.

إذا كانت البلازما في حالة اتزان ديناميكي حراري، نجد كثافة الالكترونات n_e تعطى بالعلاقة الاتية:

$$n_e \propto e^{e\Phi/k_B T_e} \qquad (1.8)$$

حيث: φ الجهد الكهروستاتيكي، و k_B ثابت بولتزمان، و T_e درجة حرارة الالكترونات..

وميزة تلك المعادلة تجعل الحالة قادرة على حساب المجال الكهربي من الكثافة:

$$\vec{E} = (k_B T_e/e)(\nabla n_e/n_e) \qquad (1.9)$$

يمكن إنتاج بلازما ليست شبه محايدة، فمثلا كثافة البلازما غير المحايدة يجب أن تكون قليلة أو صغيرة جدا، وإلا فإنها ستنتشر بطريقة الكهرباء الساكنة غير المرغوب فيها. في البلازما الكونية، يمنع حاجز ديباي المجال الكهربي من التأثير المباشر على البلازما، خلال مسافة كبيرة (أبعد من طول ديباي). ولكن ظهور الجزيئات المشحونة يجعل البلازما تولد، وتتأثر بالمجال المغناطيسي. وهذا يسبب سلوكًا معقدًا مثل نشوء الطبقات المزدوجة، التي تفصل الشحنات عن بعضها البعض، خلال العشرات من أطوال ديباي. تتأثر ديناميكا البلازما مع المجالات المغناطيسية سواءا الخارجية أو المنتجة ذاتيا.

المغنطة

البلازما الممغنطة هي التي توضع في مجال مغناطيسي قوي؛ لدرجة أنه يؤثر على حركة الجسيمات المشحونة. المعيار الكمي الشائع هو أن الجسيم يكمل على الأقل دورة كاملة حول المجال المغناطيسي، قبل الاصطدام (بمعنى ω_{ce} / v_{coll} أكبر من 1؛ حيث إن ω_{ce} هو عدد دورات الإلكترون حول المجال و v_{coll} هو معدل اصطدام الإلكترون). يكون بالعادة أن الإلكترونات ممغنطة والأيونات غير ممغنطة. تكون البلازما الممغنطة متباينة الخواص؛ بمعنى أن

هناك خصائص البلازما في اتجاه موازٍ للمجال المغناطيسي، وتختلف عن تلك البلازما العمودية على المجال. بما أن المجال الكهربي بالبلازما يكون ضعيفاً بسبب قوة التوصيل، إلا أنه يتوافق مع حركة البلازما بالمجال المغناطيسي بالمعادلة التالية:

$$E = -v \times B \qquad (1.10)$$

حيث: E هو المجال الكهربي...، وv هو السرعة وB هو المجال المغناطيسي)، وهذا المجال الكهربي لم يتأثر بحاجز ديباي، ولكن على أطراف البلازما يكون المجال الكهربي أساسا صفر.

مقارنة بين طوري البلازما والغاز

البلازما هي الحالة الرابعة للمادة، وتتميز عن غيرها من حالات المادة بالطاقة الهائلة، التي تمتلكها. وهو ذو صفات مقاربة للحالة الغازية، ولكن ليس له شكل محدد أو كتلة. ينظر العلماء إلى البلازما على أنها أكثر أهمية من الغاز؛ بسبب الحالات المتميزة لها. ويوضح الجدول التالي الفرق بين الحالتين البلازما والغاز:

الخاصية	الغاز	البلازما
توصيل كهربي	ضعيف جدا. الغازات عازل قوي، إلا في حالة تحولها إلى مادة بلازمية، في مجال كهربي، قوته فوق 30 كيلوڤولت/ سم.	قوي جدا. لأغراض عديدة التوصيل بالبلازما، فمن الممكن أن يعامل على أنه غير محدود.
الأنواع التي تمثلها	نوع واحد. تتصرف جميع الجزيئات بطريقة مشابهة، تتأثر بالجاذبية وتتصادم مع بعضها البعض.	اثنان أو ثلاثة. إلكترون أو أيون أو محايد، وتتوزع حسب نوع الشحنة، وتتصرف عند أكثر الحالات باستقلالية حسب الحجم والسرعة والحرارة، وبظهور أنواع جديدة من الموجات وعدم الاستقرارية.

توزيع السرعة	نظام ماكسويل لتوزيع السرعات. يتبع التصادم نظام ماكسويل لتوزيع السرعات عند جميع الجزيئات، عدا بعض الجزيئات السريعة.	غير خاضع لنظام ماكسويل. تفاعلات التصادم ضعيفة عند البلازما الحارة والقوة الخارجية قادرة على تحريك البلازما من مكانها المتوازن وتؤدي إلى كثافة قوية من الجسيمات السريعة الغير عادية.
التفاعلات	مزدوج. اصطدام بين جسيمين، ونادرًا بين ثلاثة.	تراكمي. تموج أو حركة منتظمة للبلازما مهم جدا لأن الجسيمات تتفاعل لمجالات أبعد خلال القوى الكهربية والمغناطيسية.

حالات البلازما المعقدة

على الرغم أن المعادلات التي تحكم البلازما هي بسيطة نوعاً ما، إلا ان سلوك البلازما غير عادي ومتغير وفيه ذكاء. إن ظهور تصرف غير متوقع من شكل عادي هو تصرف طبيعي من نظام معقد، ومثل هذه النظم تميل – في بعض الأحيان – في سلوكها ما بين النظام والفوضى، ومن الصعب وصفها سواءً عبر قوانين رياضية بسيطة، أو بالعشوائية التامة. والشكل (٧) هو أحد حالات البلازما المعقدة، الناتجة من انفجار نجم من مجرة؛ حيث يحدث تمدد للبلازما وتنبعث الأشعة السينية بواسطة الإلكترونات ذات الطاقة الحركية الكبيرة.



شكل (٧): بقايا نجم متفجر عبارة عن كرة ضخمة من البلازما المتمددة، الغلاف الخارجي الموضح باللون الأزرق، هو الأشعة السينية المنبعثة نتيجة للإلكترونات السريعة.

التشكيل العفوي من الميزات المكانية بالسلسلة الواسعة من الجداول الطويلة هو أحد مظاهر التعقيد بالبلازما. أغلب تلك الجسيمات تمت دراستها معمليًّا فيً بادئ الأمر، ومن ثمّ تعرف الناس عليها.

تشتمل أمثلة على تعقيدات وتركيب الأجسام بالبلازما على:

التفتيل

ترى الشروخ والقنوات أو الأشياء الضئيلة في أغلب البلازمات، مثل: كرة البلازما، والشفق والبرق، والتقوس الكهربي ووهج الشمس، وترتبط أحيانًا بقايا الانفجار النجمي فهي مع أكبر كثافة موجودة، وتسمى بالحبال المغناطيسية.

الكتل أو الطبقات المزدوجة

الصفائح الضيقة ذات الحواف الحادة، مثل: الكتل أو الطبقات المزدوجة، تسبب التغير السريع بخصائص البلازما. بينما تكون الطبقات المزدوجة مسئولة عن تمركز الشحنات المنفصلة، والتي تسبب الاختلاف الكبير بالجهد خلال الطبقة ولكن لا تولد أي مجال كهربائي خارجها. تباعد الطبقات

المزدوجة بين مناطق البلازما المتقاربة بأشكال مختلفة، وتكون موجودة بالعادة بالتيارات حاملة البلازما، وهي تعجل سرعة الإلكترونات والأيونات.

المجال الكهربي والدوائر

تتطلب خاصية شبه الحيادية بالبلازما من تيارات البلازما، أن تكون متقاربة من بعضها البعض بالدوائر الكهربية، وهذه الدوائر تخضع لقانون كيرشوف للدائرة الكهربية، وتحتوي على مقاومة وعامل مستحث.. وتلك الدوائر يجب أن تعامل كنظام مزدوج قوي، كل منطقة بلازما مستقلة بسلوكها بالدائرة الداخلية.. إنها الترابط القوي بين عناصر النظام معًا مع عدم الاستقامة؛ مما يقود إلى سلوك معقد. تخزن الدوائر الكهربية بالبلازما طاقة مستحثات (مغناطيسية)، وأن تكون تلك الدائرة معطلة؛ فمثلاً عند عدم استقرار البلازما، بينما تخرج الطاقة المستحثة كمسخن ومسارع للبلازما، وهذا هو تفسير الحرارة التي توجد بالهالة الشمسية. التيار الكهربي وبالتحديد المجال المغناطيسي المصطف مع التيار الكهربي (الذي أحيانًا يشير إلى تيارات بيركلاند) تلاحظ عادة بالشفق الأرضي، وفي فتائل البلازما.

البناء الخلوي

يمكن أن تعزل الصفائح الضيقة ذات الحواف الحادة المناطق مع خواصهم المختلفة، مثل: المغناطيسية والكثافة والحرارة؛ مما ينتج مناطق تشبه الخلايا. الأمثلة على ذلك المحيط المغناطيسي والمحيط الشمسي، وغطاء المجال الشمسي. كتب هنز ألفن: وجهة نظر عالم بالكونيات، هو أن أهم أبحاث اكتشافات الفضاء، هو بالاحتمال تكوين الكون الخلوي كما تبين في كل منطقة من مناطق الفضاء التي يمكن الاطلاع عليها في الموقع، وهناك عدد من الحوائط الخلوية، وصفائح من التيار الكهربي، التي تقسم الكون إلى أقسام مع اختلاف بالمغناطيسية والحرارة والكثافة ...إلخ.

سرعة التأين الحرجة

هي السرعة النسبية ما بين البلازما المتأينة والغاز المحايد؛ حيث يحصل التأين للغاز. عملية التأين الحرجة، هي تقنية عامة للتحويل الطاقة الحركية لتدفق الغاز السريعة إلى طاقة البلازما أو التأين الحرارية. وإذا ضخت طاقة أكثر.

فإن سرعة الذرات أو الجزيئات لن تتعدى سرعة التأين الحرجة، حتى يكون الغاز كامل التأين، وهذه الظاهرة الحرجة هي حالة نموذجية من نظام معقد، ويمكن أن تؤدي إلى ميزات مكانية أو زمانية شديدة.

البلازما الشديدة البرودة

يمكن إنتاج بلازما شديدة البرودة باستخدام الليزر؛ لإمساك وتبريد الذرات المحايدة إلى درجة حرارة، تعادل ١مللي كلفن أو أقل، وليزر آخر يؤين الذرات بواسطة إعطاء الإلكترونات الأبعد طاقة كافية؛ للخروج من مجالها الذري. النقطة المهمة في البلازما الشديدة البرودة، هي معالجة الذرات بدقة بواسطة الليزر، والسيطرة على طاقة الحركة للإلكترونات المتحررة. وباستخدام ليزر نبضي معين، يمكن إنتاج طاقة إلكترون مقارنة لدرجة حرارة صغيرة تعادل ٠,١ كالفن، ونطاق التردد لليزر النبضي محدد سلفًا؛ فالأيون يحافظ على درجة حرارة تساوي مللي كالفن في الذرة المحايدة. وهذا النوع من البلازما الشديدة البرودة غير المتوازنة ينشأ بسرعة، ويضع أسئلة كثيرة لهذا السلوك دون إجابة لها، وأفضت التجارب إلى كشف ديناميكات غريبة وسلوك إعادة الارتباط؛ مما زاد من حدود معرفتنا بعلم البلازما. إحدى الحالات غير المستقرة للبلازما غير المثالية هي حالة ريدبرج، والذي يشكل من تكثيف الذرات بالإثارة.

البلازما اللاحيادية

الشبه حيادية هي مقدرة ومدى قوة الإلكترون، وجودة التوصيل بالبلازما، تلك التي تضمن عادة تعادلاً في كثافة الشحنات السالبة والموجبة لكل نطاق محدد. أما البلازما المحتوية على كمية إضافية من كثافة شحنة معينة بحالات قصوى يتكون، فقط، لصنف واحد يسمى بلازما لاحيادية. وبالبلازما المجال الكهربي هو المهيمن، مثل: حزمة الجزيئات المشحونة، والغيوم الإلكترونية، والبلازما البوزيترونية (هو جسيم مضاد مساوي لكتلة الإلكترون، وذو شحنة موجبة).

البلازما المغبرة والبلازما الحبيبية

تكون البلازما المغبرة بالفضاء الكوني عادة، وتتميز بوجود الغبار فيها، فإذا صارت الجسيمات أكبر.. فإنها تكون حبيبية، ولها تصرفات البلازما.

وصف رياضي

لوصف حالة البلازما تمامًا، فإننا نحتاج لنعرف أماكن وسرعة الجسيمات ووصف المجال الكهرومغناطيسي بمنطقة البلازما، ولكن ليس من الضروري أن نفحص جميع الجسيمات بالبلازما، ولهذا يعطى علماء البلازما بتفصيل أقل للنماذج المعروفة، وهناك نوعان مهمان، هما:

نموذج الموائع

يصف نموذج الموائع البلازما من حيث الكميات السهلة، مثل: الكثافة والسرعة المتوسطة حول كل موقع. وأحد نماذج الموائع البسيطة نظرية ديناميكية هيدرومغناطيسي (ديناميكيات الموائع الموصلة في مجالات كهربية ومغناطيسية شبه مستقرة، وقد تكون هذه الموائع معادن فلزية سائلة كالزئبق أو الفلزات القلوية المنصهرة، أو قد يكون غازًا ضعيف التأين أو بلازمات) وهي تتعامل مع البلازما كمائع وحيد محكوم بتركيبة من (معادلات ماكسوين ومعادلات نافير-ستوك). والوصف الآخر هو نظام الموائع الثنائي؛ حيث إن الإلكترون والأيون يعاملان منفصلين عن بعضهما البعض. ويكون نظام الموائع عادة دقيقًا، إذا صار الاصطدام عاليًا بدرجة كافية؛ لكي يصل توزيع سرعة البلازما مقاربًا لقانون (توزيع ماكسويل بولتزمان). والسبب أن نظام الموائع يصف البلازما كمجرى واحد، بدرجة حرارة محددة لكل موقع مكاني، فإنه لا يمكنه اصطياد سرعة الأجسام الفضائية، مثل: الشعاع أو الطبقات المزدوجة، ولا يحل تأثير أجسام الموجات.

النموذج الحركي

يصف هذا النموذج توزيع سرعة الجسيم لكل نقطة بالبلازما، ولا نحتاج للافتراض بقانون توزيع ماكسويل بولتزمان. وصف الحركة ضروري للبلازما العديمة الاصطدام، وهناك طريقتان معروفتان لوصف الحركة بالبلازما: الأولى تعتمد وظيفة التوزيع السهل على الشبكة في السرعة والموقع، أما الأخرى فتسمى تقنية الجزئ في الخلية، فتضم المعلومات الحركية باتباع مسارات لعدد كبير من الجزيئات الفردية. نموذج الحركي أكثر كثافة حسابيًا من نموذج الموائع، ويستخدم معادلة فلاسوف لوصف نشوء نظام الجزيئات بالبيئة.

تقريب البلازما المثالية

أحد المعايير التي تحدد مجموعة الجسيمات المشحونة، وتوصف بدقة البلازما هو ٨>>١، عندما تكون بهذه الحالة.. فإن التفاعلات الجماعية للكهرباء الستاتيكية تسيطر على الاصطدامات الثنائية، ويمكن التعامل مع جسيمات البلازما كما لو أنها تتفاعل بمجال خلفية ناعمة، أفضل من التفاعلات (الإصطدامات) الزوجية الخشنة. معادلة الحالة في البلازما المثالية هي نفسها في الغاز المثالي.

البلازما الاصطناعية

تنتج معظم البلازما الصناعية بتطبيقات المجالات الكهربية أو المغناطيسية أو كليهما. والبلازما المنتجة مخبريًّا ثم للاستخدام الصناعي، يمكن أن تصنف بشكل عام، حسب:

- نوع مصدر الطاقة المنتجة لتلك البلازما، بمعنى التيار الكهربي، تردد موجي، وتردد ذو الموجات الدقيقة (Microwave).
- مجال الضغط لديها: ضغط الفراغ < ١٠ مللي تور، ضغط جزئي ~ ١ تور، الضغط الجوي ٧٦٠ تور=١ بار=١,٠١٣ نيوتن/متر مربع.
- درجة التأين بالبلازما: تأين كامل، تأين نسبي، تأين ضعيف.
- علاقة الحرارة داخل البلازما: بلازما حرارية ($T_{gas} \approx Te = T_{ion}$)، بلازما غير حرارية أو باردة ($T_{gas} \approx T_{ion} << Te$).
- شكل القطب المستخدم لتوليد البلازما.
- مغناطيسية الجسيمات الداخلة بالبلازما: ممغنطة (الأيون والإلكترون كلاهما محاصران في مدار لارمور، بواسطة المجال المغناطيسي)، ممغنطة جزئيًّا (الإلكترونات فقط هي المحاصرة بواسطة المجال المغناطيسي)، غير ممغنطة (حيث المجال المغناطيسي ضعيف عن إمساك الجزيئات حول المدارات).
- الاستعمال والتطبيق.

أمثلة على البلازما الصناعية

إفراغ بالضغط منخفض

- **بلازما تفريغ متوهج:** بلازما غير حرارية، تتولد بتطبيقات من التيار الكهربي المستمر، أو تردد منخفض لموجات المجال الكهربي للفراغ ما بين

قطبين معدنيين (أقل من ١٠٠ كيلوهرتز)، وأشهر تطبيق لذلك هو إضاءة الفلوريسنت.

- **بلازما التقارن بالسعة:** شبيهة لما قبلها، ولكن تحتاج إلى مجال كهربي ذي تردد عالٍ من الموجات (تقديريا ١٣,٥٦ كيلوهرتز). وهذه تختلف عن التفريغ المتوهج بأن الأغلفة أقل كثافة بكثير، وهذه التطبيقات تستخدم بشكل شائع في: الصناعات الدقيقة، وصناعة الدوائر المتكاملة لعمل النقش البلازمي، والإزالة بالبلازما المعززة بالأبخرة الكيميائية.
- **بلازما التقارن بالحث:** مشابه للتقارن بالسعة ومشابه بالتطبيقات، ولكن القطب يحتوي على ملف، يغطي منطقة التفريغ؛ مما يثير البلازما بالحث.
- **بلازما الموجات المسخنة:** مشابهة للتقارن بالحث والسعة من حيث الترددات، ولكن الموجات تسخن بواسطة كلتا الوسيلتين الكهروستاتيكية والكهرومغناطيسية، وهي تحتاج إلى مجال مغناطيسي، متحد المحور لانتشار الموجات.

إفراغ بالضغط الجوي

- **التقوس الكهربي:** وهو ما يسمى باللحام، وهي طاقة لتصريف درجات حرارة عالية (~ ١٠٠٠٠ كالفن). وتولد من عدة مصادر طاقة. وتستخدم بشكل عام بعمليات التعدين؛ فعلى سبيل المثال، تستخدم لإذابة الصخور المحتوية على أكسيد ألومنيوم؛ لإنتاج معدن الألمونيوم.
- **التفريغ الإكليلي:** تفريغ لا حراري، ويولد بواسطة تطبيق جهد كهربي عالٍ على الأطراف الحادة للقطب. ويستخدم بشكل عام لتوليد غاز الأوزون، ومرسبات الجسيم.
- **تفريغ حاجز العازل الكهربي:** تفريغ لا حراري، يولد بتطبيق جهد كهربي عالٍ، خلال فجوات بحيث العازل غير الموصل، يمنع انتقال تفريغ البلازما إلى تقوس. والعادة يخطأ بالتسمية بالتفريغ الإكليلي بالصناعة مع إنهما متشابهان بالتطبيقات. وتستخدم بنطاق واسع لعمل تشابك الأنسجة الصناعية واللدائن.

الفصل الثانى
حركة الجسيمات المشحونة فى البلازما

مدخل

لماذا ندرس حركة الجسيم الفردي، في حين أن البلازما هي تجمع من الجسيمات المشحونة؟

لأن هناك عديدًا من الظواهر التى يمكن أن تفهم من خلال وصف حركة الجسيم الفردي، الذي يتحقق تحت ظروف معينة. مثال ذلك الجسيمات ذات الطاقة العالية في البلازما الأقل كثافة؛ حيث تندر التصادمات، وأيضا تتطلب إهمال المجالات المستحثة من حركة الجسيمات، مقارنة مع المجالات المسلطة. من المستحيل حل معادلة الحركة تحليليًّا في الحالة العامة؛ حيث تعتمد المجالات على الإحداثيات الفراغية والزمنية.

دراسة حركة الجسيمات المشحونة في المجالات المغناطيسية لها علاقة بكل من فيزياء البلازما والأشعة الكونية والمعجلات وغيرها من الدراسات.

نود الآن أن ننظر في تأثيرات المجالات المغناطيسية على سلوك البلازما؛ ولاسيما في البلازما ذات درجة الحرارة العالية (الساخنة)، حيث التصادمات نادرة؛ فمن المهم دراسة حركة الجسيمات الفردية، التي تحكم وفقًا لقوة لورنتز من أجل فهم حصر الجسيمات. ويمكن الحصول على حلول دقيقة لمعادلة القوة، على سبيل المثال، في مجال مغناطيسي ثابت ومنتظم. نجد أن الجسيمات المشحونة تتحرك لولبيًّا في مسار حلزوني حول خط القوة. ومع ذلك، فإن هذا الحلزون يحدد بوحدة زمنية أساسية – ω_c التردد السيكلوتروني، ومقياس المسافة الأساسية – دائرة نصف قطرها لآرمور r_L

المجالات غير المتجانسة والمتغيرة مع الزمن، ولها مقاييس طولية L وزمنية ω كبيرة مقارنة مع ω_c r_L، وغالبا ما يكون من الممكن توسيع نطاق المعادلات المدارية (r_L/L) و$(\omega / \omega c)$. في هذا "الانجراف"، مركز التوجيه أو التقريب الأديباتيكي، تتحلل الحركة الى دوران حلزوني محلي، جنبًا إلى جنب مع

معادلة الحركة للمركز اللحظي لهذا الدوران (المركز التوجيهي). تبين أن بعض الثوابت الأديباتيكية للحركة تسهل كثيرًا لفهم الحركة في المجالات المكانية والزمانية المعقدة. نبدأ هذا الفصل بتحليل تحركات الجسيمات في المجالات المنتظمة والثابتة مع الزمن، ويعقب ذلك دراسة حركة الجسيمات في المجالات الكهربائية والمغناطيسية المتغيرة، وكذلك المجالات غير المتجانسة في نهاية المطاف.

المجالات المنتظمة والثابتة مع الزمن

معادلة الحركة

معادلة الحركة لجسيم ذات كتلة m وشحنة، يتحرك بسرعة V، في وجود مجال كهربي E ومجال مغناطيسي B، توصف بقانون قوة لورنتز:

$$\boldsymbol{F} = m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = q(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}) \qquad \textbf{(2.1)}$$

في حالة وجود المجال الكهربي فقط

تزداد سرعة الجسيم خطيًا مع الزمن (تعجيل) في اتجاه المجال E

في حالة وجود المجال B

أى إن المجال الكهربي يساوي صفرًا، والمجال المغناطيسي ثابت ومنتظم.. وعندئذ يسلك الجسيم مسارًا حلزونيًا، وبالتالي تصبح معادلة الحركة:

$$m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = q\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$$

بأخذ نظام المحاور الكارتيزية، وأن متجه الوحدة $\hat{k}$ في اتجاه المجال B بمعنى $B = B\hat{k}$

عندئذ تكتب المعادلة على الصورة الآتية:

$$m\dot{v} = q\begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ 0 & 0 & B \end{vmatrix} \qquad \textbf{(2.2)}$$

وبفصل مكونات المعادلة:

$$m\dot{v}_x = qBv_y \qquad m\dot{v}_y = -qBv_x \qquad m\dot{v}_z = 0. \qquad \textbf{(2.3)}$$

$$\ddot{v}_x = \frac{qB}{m}\dot{v}_y = -\frac{q^2B^2}{m^2}v_x$$

$$\ddot{v}_x = -\left(\frac{qB}{m}\right)^2 v_x \qquad \ddot{v}_y = -\left(\frac{qB}{m}\right)^2 v_y \qquad (2.4)$$

$$\ddot{v}_y = -\omega_c^2 v_y \qquad (2.5)$$

وهذا يصف المذبذب التوافقي البسيط، عند التردد السيكلتروني، الذي يعـرف بالمعادلة:

$$\omega_c = \frac{|q|\ B}{m} \qquad (2.6)$$

نفـــرض ان شـــدة المجـــال المغناطيـــسي B=1Tesla نجـــد $\omega_{ce} = 28$ GHz and $\omega_{ci} = 15.2$ MHz (proton) ؛ أي إن الأيونات تدوم أكثر بطئًا من الإلكترونات بسبب فرق الكتلة.

بحل المعادلات التفاضلية (4) نحصل على:

$$v_x = v_\perp \exp\left(\mathrm{i}\omega_c t\right) \qquad (2.7)$$

حيث السرعة في مستوى عمودي على المجال B

بأخذ الجزء الحقيقي $(v_x = v_\perp \cos \omega_c t)$ ، والتعـويض بالمعادلـة (7) فـي المعادلة (3).

عندئذ نحصل على:

$$v_y = \frac{m}{qB}\dot{v}_x = \frac{\mathrm{i}m\omega_c}{qB}v_\perp \exp\left(\mathrm{i}\omega_c t\right) = \pm \mathrm{i}v_\perp \exp\left(\mathrm{i}\omega_c t\right) \qquad (2.8)$$

حيث الخطوة الأخيرة من المعادلة، تم التعـويض عـن $q = \pm e$ للأيونـات والإلكترونات والإشارة الموجبة لدى v_y للأيونات والـسالبة للإلكترونـات، وبأخذ الجزء الحقيقي تصبح v_y :

$$v_y = \mp v_\perp \sin\left(\omega_c t\right)$$

ومحصلة السرعة في المستوى x-y المستعرض، هي:

$$(v_x^2 + v_y^2)^{1/2} = v_\perp$$

بالتكامل مرة ثانية، نحصل على:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -\frac{\mathrm{i}v_\perp}{\omega_c}\exp(\mathrm{i}\omega_c t) \\ y - y_0 &= \pm\frac{v_\perp}{\omega_c}\exp(\mathrm{i}\omega_c t) \end{aligned} \quad (2.9)$$

بأخذ الجزء الحقيقي، نحصل على:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= r_L \sin(\omega_c t) \\ y - y_0 &= \pm r_L \cos(\omega_c t) \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r_L^2$$

يمكن تعريف نصف قطر لآرمور من العلاقة:

$$r_L = \frac{v_\perp}{\omega_c} = \frac{mv_\perp}{|q|\,B} \quad (2.11)$$

في الإطار المرجعي، يتحرك الجسيم بسرعة $v_{\parallel}$ والمدار يكون دائرة نصف قطرها r_L ، ومركز التوجيه (x_0, y_0)، وتدوم الأيونات في اتجاه عكس عقارب الساعة، بينما تكون الالكترونات اتجاه عقارب الساعة (انظر الشكل ١). تتبع الجسيمات المشحونة خطوط القوى، في حالة انعدام المجال الكهربي، ومجال مغناطيسي متجانس.

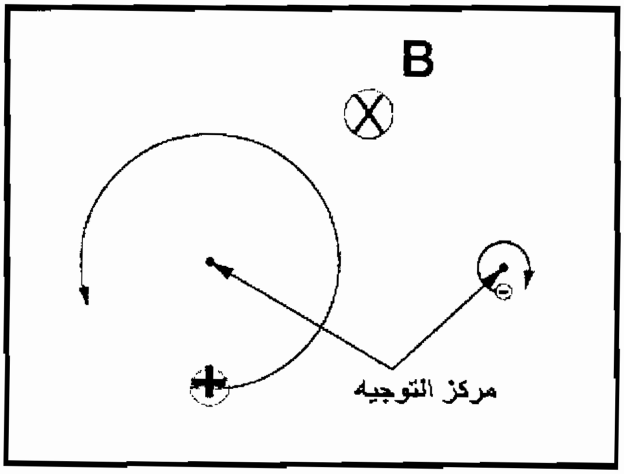
الدايامغناطيسية

الجسيمات الحلزونية نفسها تكون حلقات تيارية تولد حثًّا مغناطيسيًّا إذا اعتبرنا أن هذا الحث ناتج عن الأيونات بالرجوع إلى الشكل (١)، يتضح أن الحث داخل المدار متجه داخل الصفحة، وهذا عكس اتجاه المجال المغناطيسي B المتجه خارج الصفحة، والحقيقة نفسها لدى الإلكترونات عكس السرعة V وعكس الشحنة q. التيار الساري في الحلقة، هو $I = q(\omega_c/2\pi)$ ، ومساحة الحلقة $A = \pi r_L^2$ ؛ بمعنى أن عزم الثنائي المغناطيسي هو $I.A$ (يتناسب مع الفيض المغناطيسي المستبعد ΔBA) هو:

العزم المغناطيسي

$$\begin{aligned}\mu &= IA \\ &= \frac{q\omega_c}{2\pi}\frac{\pi v_\perp^2}{\omega_c^2} \\ &= \frac{mv_\perp^2}{2B}\end{aligned} \qquad (2.12)$$

الذي يتناسب مع طاقة الحركة العمودية عبر شدة المجال. النقطة المهمة هنا أن البلازما دايامغناطيسية – كل جسيم يولد فيض، يعمل على تقليل المجال المحيط. يتناسب التغير الكلي في المجال B مع طاقة الحركة العمودية للجسيم المشحون. كلما زادت الطاقة الحرارية للبلازما، كان استبعاد المجال المغناطيسي أكثر. وهذه النتائج تؤدي إلى التوازن مابين الضغط الحراري والضغط المغناطيسي، كما نرى لاحقا. يتم قياس تدفق الفيض المستبعد بحلقة خارج البلازما لتطويقها، أثناء تسخين جسيمات البلازما. وهذه وسيلة أساسية للغاية لقياس الطاقة الحرارية العمودية للبلازما المختزنة.



الشكل (١): مدارات لآرمور في المجال المغناطيسي.

هذا الشكل يصف المدار الدائري لمركز التوجيه. المجال المغناطيسي الناتج من تدويم الجسيمات المشحونة يكون مضادًا للمجال المطبق خارجيًّا. وبناء على ذلك، تتجه جسيمات البلازما لتخفيض المجال المغناطيسي، وتكون البلازما دايامغناطيسية. بالإضافة إلى هذه الحركة، توجد سرعة عشوائية على طول المجال B، التي تكون غير متأثرة بذلك المجال B، ويكون مسار الجسيم المشحون عموما يكون حلزونيًّا.

المجالات الكهربية والمغناطيسية

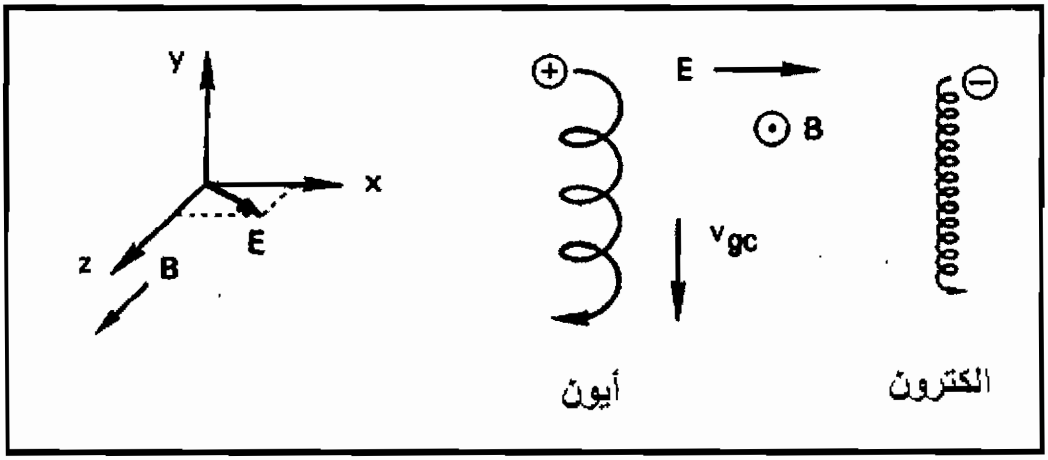
في حالة وجود المجال الكهربي E عمودي على المجال المغناطيسي B، كما بالشكل (٢)، عندما تتحرك الأيونات في اتجاه E يحدث تعجيل (تسرع)، ويزداد نصف قطر مدارها $(r_L = v/\omega_c)$. من ناحية ثانية، عندما تتحرك الأيونات ضد المجال يقل نصف قطرها. ونتيجة لذلك، يعاني من حركة دائرية مع انجراف لمركز التوجيه، في اتجاه عمودي على كل من E و B. أما بخصوص الإلكترونات، نجد أن المدارات الدائرية لها أصغر بسبب فرق الكتلة، ومع ذلك نلاحظ الملامح المهمة الآتية:

(i) انجراف كل من الإلكترونات والأيونات في الاتجاه نفسه $E \times B$: شحنة الإلكترون عكس شحنة الأيون، وبالتالي يدور كل منهما عكس الأخر.

(ii) سرعة الانجراف لكل من الإلكترونات والأيونات واحدة: انجراف الإلكترونات أقل لكل دورة، ولكن يعاني من دورات أكثر لكل ثانية.

يمكن تعميم معالجة المجالات العشوائية بتحليل E إلى مركبتين. إحداهما موازية، والأخرى عمودية على B، وتكتب الحركة الموازية على الصورة:

$$m\dot{v}_{\parallel} = qE_{\parallel} \qquad (2.13)$$



الشكل (٢): انجراف الإلكترونات والأيونات في الاتجاه نفسه وبالسرعة نفسها.

وهي تصف العجلة الحرة على طول المجال B، وتوصف الحركة العمودية بالعلاقة:

$$m\dot{v}_{\perp} = q(E_{\perp} + v_{\perp} \times B). \qquad (2.14)$$

بالتحويل إلى الإطار المرجعي ليتحرك بسرعة انجراف v_E الى تلك العلاقة $v = v_E + v_c$ ، وتصبح المعادلة (١٤):

$$m\dot{v}_c = q(E_\perp + v_E \times B) + qv_c \times B. \qquad (2.15)$$

في إطار الانجراف السرعة v_c هي سرعة السيكلترونية؛ أي:

$$E_\perp + v_E \times B = 0. \qquad (2.16)$$

ويمكن حل هذه المعادلة بالنسبة v_E بعد الضرب الاتجاهي $\times B$:

$$\begin{aligned} E_\perp \times B &= -(v_E \times B) \times B \\ &= v_E B^2 - B(v_E . B) \end{aligned} \qquad (2.17)$$

يخضع ناتج الضرب الاتجاهي لعلاقة الضرب الآتية:

$$(A \times B) \times C = B(C.A) - A(C.B). \qquad (2.18)$$

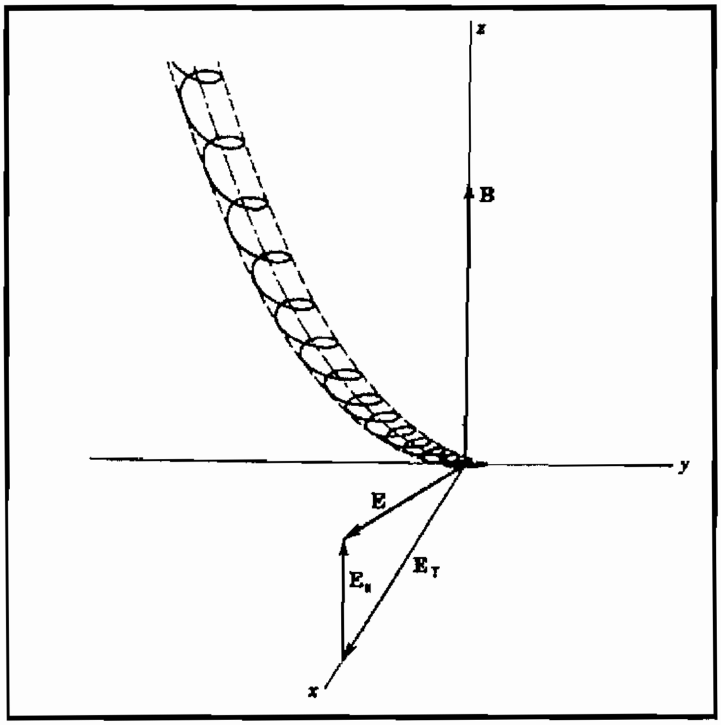
بما أن السرعة v_E عمودية على B، فإن الجزء الثاني من المعادلة (17) عندئذ يساوي صفرًا وتنتج العلاقة:

$$v_E = \frac{E \times B}{B^2}. \qquad (2.19)$$

تصف المعادلة (15) الحركة السيكلترونية المتبقية للجسيم، حول خطوط المجال بسرعة زاوية ω_c ونصف قطر $r_L = v_c/\omega_c$ الحركة الكلية للجسيم مكونة من ثلاثة أجزاء:

$$v = v_\parallel \hat{k}\ (\text{على طول المجال}) + v_E\ (\text{الانجراف العمودي}) + v_c\ (\text{تدويم لآرمور}) \qquad (2.20)$$

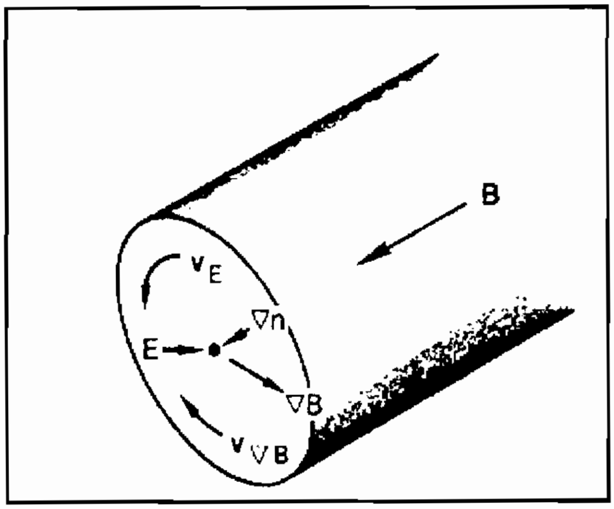
في هذه الحالة v_E هي سرعة الانجراف العمودية لمركز التوجيه لمدار لآرمور، عندما $E_\perp$ تساوي صفر، وعندئذ يكون المدار حول المجال B دائريًا، وعندما E ذات قيمة محدودة، يصبح المدار دويريًا وهذه الحركات تلخص بالشكل (٣).



الشكل (٣): المدار في ثلاثة أبعاد لجسيم مشحون في كهربية ومغناطيسية منتظمة.

دوران البلازما الأسطوانية

سوف يسبب المجال الكهربي النصف قطري المسلط بين الأقطاب الأسطوانية عبر بلازما مغمورة، في مجال مغناطيسي محوري، دورانًا للبلازما في اتجاه سمتي، كما بالشكل (٤).



الشكل (٤): البلازما الاسطوانية تدور سمتيًا نتيجة للمجالين الكهربي النصف قطري، والمغناطيسي المحوري.

القوى العامة

يمكن استبدال qE في معادلة لورنتز معادلة (1) بالقوى العامة:

$$v_F = \frac{1}{q}\frac{F\times B}{B^2} \qquad (2.21)$$

كمثال ذلك انجراف الجاذبية $F = mg$، ويكتب على الصورة

$$v_g = \frac{m}{q}\frac{g\times B}{B^2} \qquad (2.22)$$

وتتغير الإشارة مع الشحنة q، وتختلف باختلاف الكتل، وهذا يعطي نهوضًا في محصلة التيار الساري في البلازما:

$$\begin{aligned} j_g &= q_e n_e v_e + q_i n_i v_i \\ &= n(m_i + m_e)\frac{g\times B}{B^2} \end{aligned} \qquad (2.23)$$

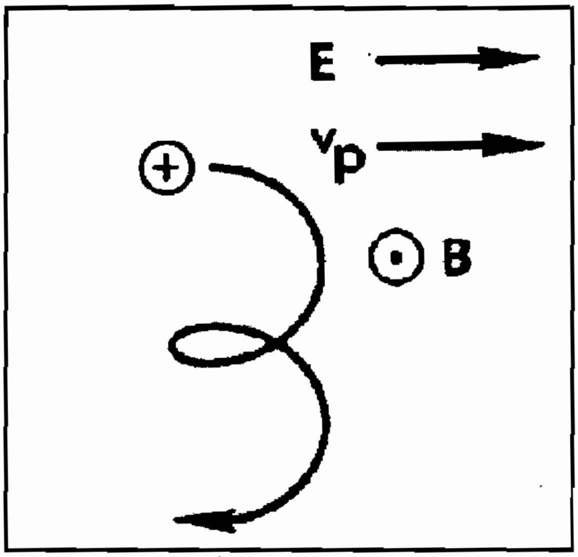
يتم إهمال المقدار j_g عادة من ناحية ثانية، وخطوط القوى المنحنية ⟸ قوة جاذبية (الطرد المركزي) ⟸ انجراف انحنائي.

التغيرات الزمنية للمجالات

التغير البطئ للمجال الكهربي

عندما يتغير المجال الكهربي مع الزمن في البلازما، عندئذ يسري تيار استقطاب، ويتضح السبب الفيزيائي لهذا التيار من الشكل (٥). نعتبر أيونًا في حالة سكون، في وجود المجال المغناطيسي. بتسليط المجال الكهربي فجأة، يتحرك الأيون في اتجاه المجال الكهربي؛ ونتيجة لذلك يكتسب الأيون سرعة v، ويدرك قوة لورنتز، ويبدأ في التحرك لأسفل، كما بالشكل. في حالة ثبات (انتظام) المجال E ينعدم الانجراف الناجم عن الاستقطاب v_p، ولكن يوجد انجراف v_E، من ناحية ثانية. إذا انعكس المجال E يوجد انجراف لحظي مرة ثانية، ولكن من ناحية اليسار. هكذا يبدأ انجراف v_p؛ نتيجة للقصور الذاتي، ويحدث فقط من النصف الدورة الأولى لكل تدويم، أثناء تغير المجال E. الخلاصة أن أي تغير زمني للمجال الكهربي يعني حدوث انجراف استقطابي، يعطى بالعلاقة:

$$\begin{aligned} v_P &= -\frac{m}{q}\frac{\dot{v}_E \times B}{B^2} \\ &= \pm\frac{1}{\omega_c}\frac{\dot{E}}{B} \end{aligned} \quad (2.24)$$



الشكل (٥): انجراف الاستقطاب.

بما ان الانجراف الأستقطابي v_p يحدث في اتجاهات مضادة لكل من الأيونات والإلكترونات، وعندئذ يوجد تيار استقطاب، يعطى بالعلاقة:

$$\begin{aligned} j_P &= ne(v_{Pi} - v_{Pe}) \\ &= \frac{ne}{eB^2}(m_i + m_e)\frac{dE}{dt} \\ &= \frac{\rho}{B^2}\frac{dE}{dt} \end{aligned} \quad (2.25)$$

حيث ρ كثافة الكتلة

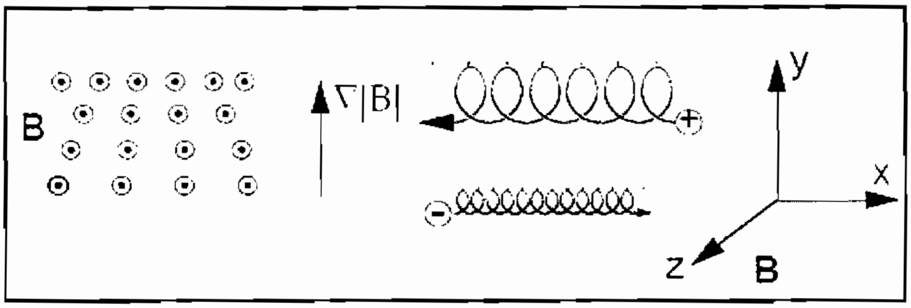
يشابه تأثير الاستقطاب في البلازما للعوازل الصلبة $D=\varepsilon_0 E+P$ ؛ حيث P يعزى متجه الاستقطاب إلى محاذاة ثنائيات القطب الكهربي، وكذلك البلازما. الثنائيات، هي: الأيونات والإلكترونات بينها مسافة r_L. إذا تذبذب المجال الكهربي، ينتج تيار مذبذب j_P من تأخر القصور الذاتي للأيون.

المجالات غير المتجانسة

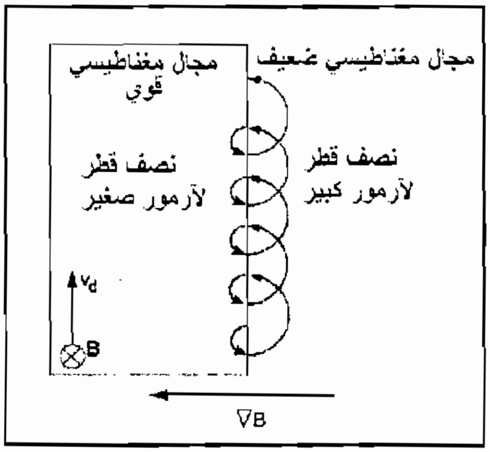
المجال المغناطيسي غير المتجانس

يمكن أن تكون عدم تجانسية المجال المغناطيسي طولية (موازية) أو مستعرضة على اتجاه المجال المغناطيسي. عدم التجانسية المستعرضة تعني تضاغطًا وتخلخلاً لخطوط المجال، كما بالشكل (٦). وعدم التجانسية الطولية يعني أن لنصف قطر لآرمور في منطقة المجال القوي اصغر قيمة في منطقة المجال الضعيف (شكل ٧). إذا تغير المجال المغناطيسي بزاويا عمودية اتجاه عبر وحدة طول بكمية $\frac{dB}{dx} = \nabla_x B$ هذه الكمية، فإن انحدار المجال المغناطيسي يعنى تغيرًا في كثافة الفيض المغناطيسي لكل وحدة الطول. العزم المغناطيسي يخضع للقوة:

$$F = -\mu \nabla_x B \qquad (2.26)$$



الشكل (٦): الانجراف الناجم عن انحدار المجال المغناطيسي.



الشكل (٧): التجانسية الطولية.

هذه القوة تسبب انجراف انحدار بسرعة عمودية على كل من اتجاه المجـــال واتجاه التغيير. والإشارة السالبة في المعادلة لدى القـــوة توضــح أن القـــوة المؤثرة في اتجاه تناقص المجال المغناطيسي.

$$\begin{aligned} v_{\nabla B} &= \frac{1}{q}\frac{F\times B}{B^2} \\ &= \frac{1}{q}\frac{\langle F_y\rangle B}{B^2}\hat{i} \\ &= \mp\frac{v_\perp r_L}{2B}\frac{\partial B}{\partial y}\hat{i}. \end{aligned} \tag{2.27}$$

$$B\times\nabla B = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 0 & B_z \\ 0 & \dfrac{\partial B}{\partial y} & 0 \end{vmatrix} \tag{2.28}$$

$$\nabla B \equiv \nabla\ |B| = \hat{i}\frac{\partial\ |B|}{\partial x} + \hat{j}\frac{\partial\ |B|}{\partial y} + \hat{k}\frac{\partial\ |B|}{\partial z}.$$

$$v_{\nabla B} = \pm\frac{1}{2}v_\perp r_L\frac{B\times\nabla B}{B^2}. \tag{2.29}$$

وهذه المعادلة توضح أن انحدار المجال المغناطيسي يؤدي إلى انجراف انحداري عمودي على كل من المجال المغناطيسي والانحدار. يتم انحراف الجـــسيمات النشطة بشكل أسرع؛ لأنها تملك نصف قطر تدويمي أكبر، وتعاني أكثر مـــن عدم التجانسية للمجال. ونلاحظ $v_{\nabla B} \propto \frac{1}{q}$؛ أي إن الانحدار مصحوبًا بتيار.

انجراف الانحناء

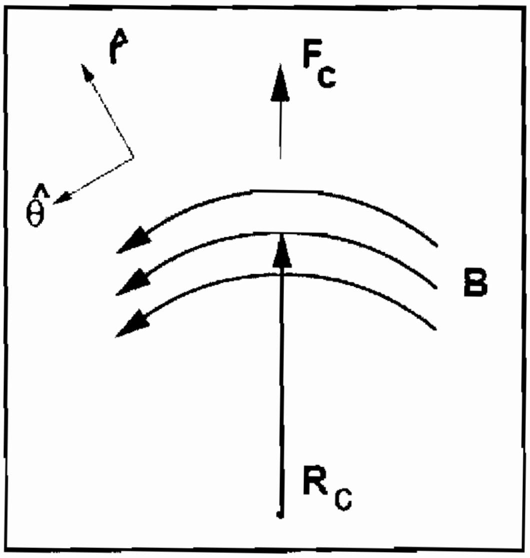
إذا حدث انحناء في خطوط المجال المغناطيسي، ونصف قطر الانحناء هـــو R_c، وهناك جسيم يتحرك على طول المجال، فإنه سوف يعاني من قوة طرد مركزي كما بالشكل (٨)، وتتناسب مع R_c في اتجاه نصف قطر الانحنـــاء، وهذه القوة تعطى بالعلاقة:

$$F_c = \frac{mv_\parallel^2}{R_c}\hat{r} = \frac{mv_\parallel^2 R_c}{R_c^2} \qquad (2.30)$$

هذه القوة تنتج انسياق طرد مركزي بسرعة:

$$v_R = \frac{mv_\parallel^2}{qB^2}\frac{R_c \times B}{R_c^2} \qquad (2.31)$$

في اتجاه عمودي على كل من خط المجال ونصف قطر الانحناء



الشكل (٨): انحراف الانحناء ينهض نتيجة الانحناء، وخطوط القوى تعتمد على الشحنة.

دمج كل من الانحدار والانحناء

نعتبر انحراف الانحدار ∇B مصحوبًا بانحناء هندسة الشكل الأسطواني، كما بالشكل (٩):

$$B = B_\theta = (B_0/r)\hat{\theta}$$

$$\nabla B = \hat{r}\frac{\partial B_0/r}{\partial r} = -\hat{r}(B_0/r^2) = -\hat{r}B_\theta/r = -r(B_\theta/r^2)$$

حيث نستخدم $\nabla \times B = 0$ في الفراغ

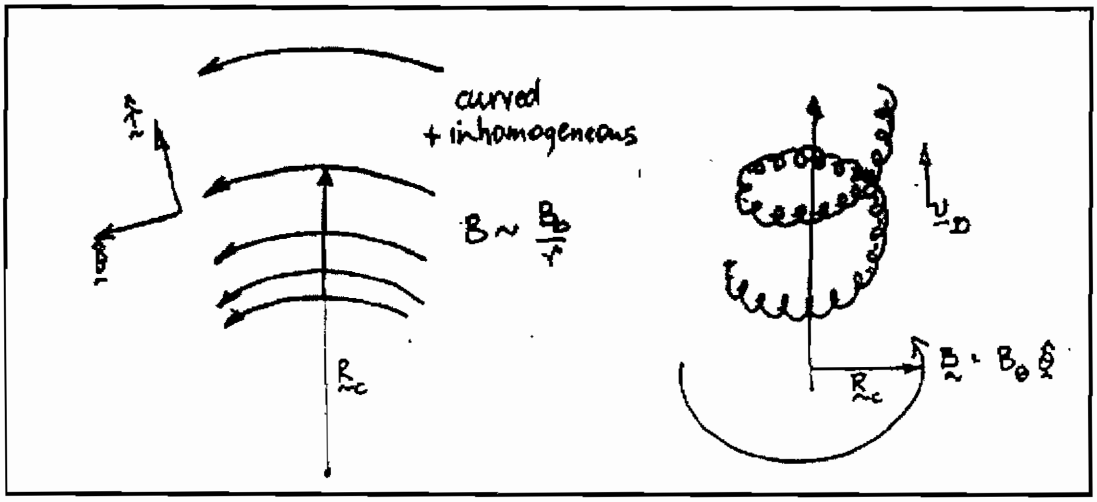
$$(\nabla \times B)_z = \frac{1}{r}\frac{\partial r B_\theta}{\partial r} \qquad \Rightarrow \qquad B_\theta \sim \frac{1}{r}$$

واستخدام المعادلة **(2.29)** :

$$\begin{aligned} v_{\nabla B} &= \pm\frac{1}{2}v_\perp r_L \frac{B \times \nabla B}{B^2} \\ &= \pm\frac{1}{2}\frac{v_\perp^2}{\omega_c}\frac{B \times (-R_c\,|B|)}{B^2 R_c^2} \qquad \textbf{(2.32)} \\ &= \frac{1}{2}\frac{m v_\perp^2}{q}\frac{R_c \times B}{R_c^2 B^2} \end{aligned}$$

حيث نستخدم $B/\omega_c = m/\,|q|$ وبدمج كل من الانحدار والانحناء نحـصل على:

$$v_T = v_{\nabla B} + v_R = \frac{m}{q}\left(\frac{R_c \times B}{R_c^2 B^2}\right)\left(v_\parallel^2 + \frac{1}{2}v_\perp^2\right). \qquad \textbf{(2.33)}$$



الشكل (٩): انسياق انحدار المجال للمجال الأسطواني.

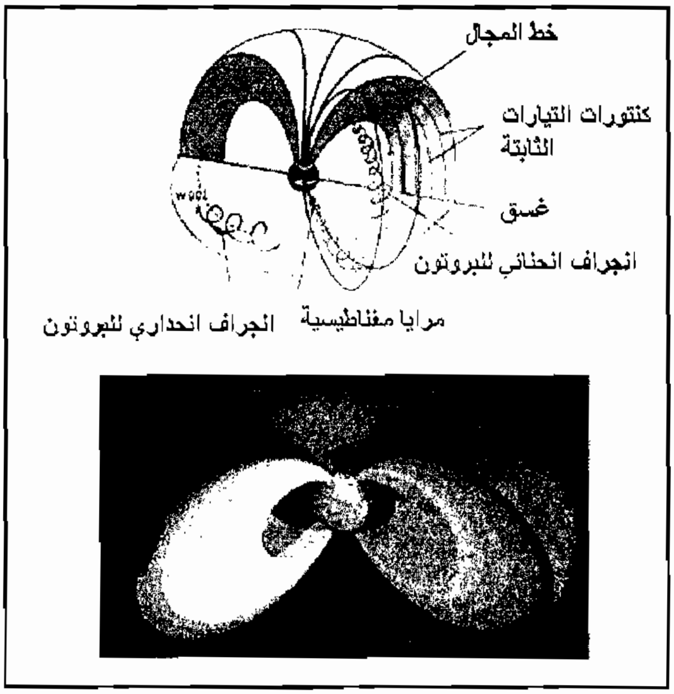
تتجه انجرافات الانحدار والانحناء إلى التحكم بالجسيمات ذات الطاقة النشطة (الساخنة)، بينما يتجه انجراف $E \times B$ إلى التحكم بالجـسيمات ذات الطاقـة المنخفضة (الباردة).

مثال على الانحدار والانحناء في الطبيعة (حزام الإشعاع)

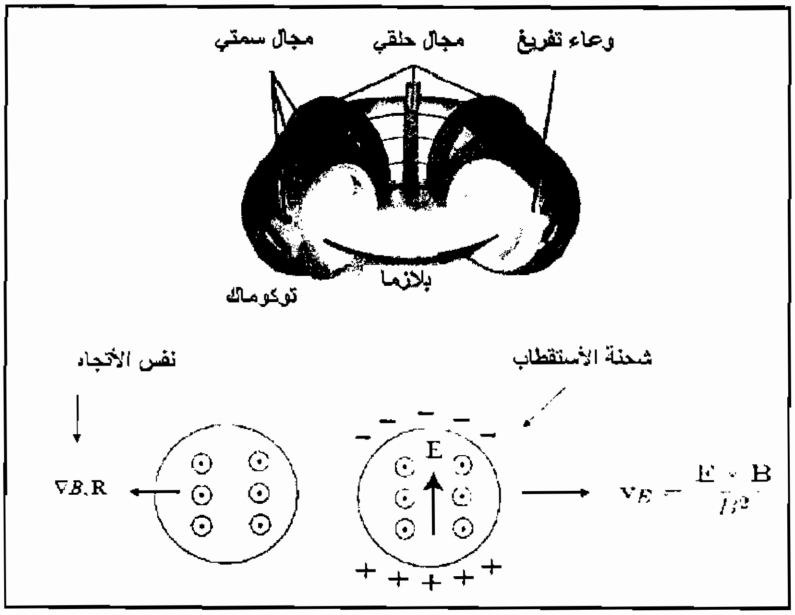
في مجال ثنائي القطب يكون كل من $v_{\nabla B}$ و v_R في الاتجاه نفسه، وتنجرف الأيونات غربا والألكترونات شرقا، وينتج تيار متجه غربا، يسمى تيارًا حلقيًّا، كما بالشكل (١٠).

مثال على الانحدار والانحناء في المختبر (التوكاماك)

يكون كل من انجرافات الانحدار والانحناء في الاتجاه نفسه، ولكن اتجاه انجراف الأيونات مضاد لاتجاه الإلكترونات، وفي النهاية تصطدم بجدران الماكينة، كما بالشكل (١١). تؤدي الشحنة المستقطبة إلى مجال كهربي يسبب انجراف $E \times B$، والجسيمات تهيئ للفقد، عندما تضرب جدران الماكينة.



الشكل (١٠): حزام الإشعاع.



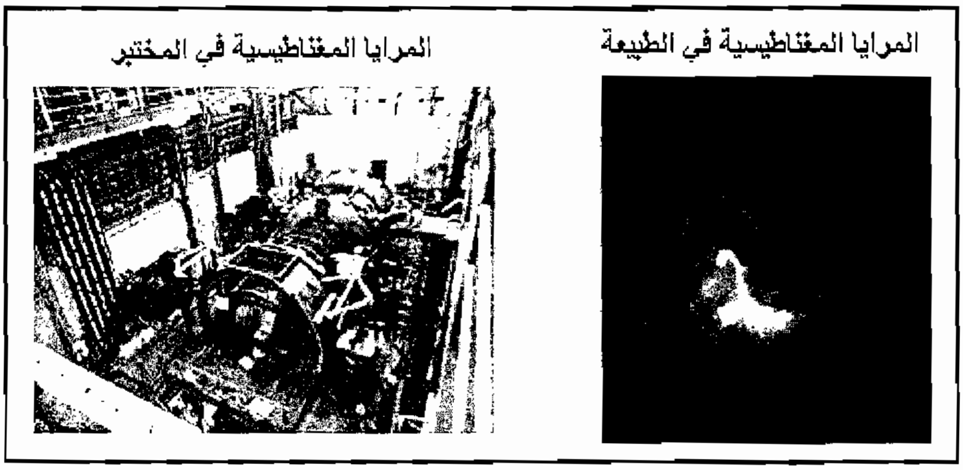
الشكل (١١): التوكاماك.

Summary of guiding center drifts

E×B Drift:	$\mathbf{v}_E = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$	
Polarization Drift:	$\mathbf{v}_P = \frac{1}{\omega_g B}\frac{d\mathbf{E}_\perp}{dt}$	$\mathbf{j}_P = \frac{n_e(m_i + m_e)}{B^2}\frac{d\mathbf{E}_\perp}{dt}$
Gradient Drift:	$\mathbf{v}_\nabla = \frac{m v_\perp^2}{2qB^3}(\mathbf{B} \times \nabla B)$	$\mathbf{j}_\nabla = \frac{n_e(\mu_i + \mu_e)}{B^2}(\mathbf{B} \times \nabla B)$
Curvature Drift:	$\mathbf{v}_R = \frac{m v_\parallel^2}{q R_c^2 B^2}(\mathbf{R}_c \times \mathbf{B})$	$\mathbf{j}_R = \frac{2n_e(W_{i\parallel} + W_{e\parallel})}{R_c^2 B^2}(\mathbf{R}_c \times \mathbf{B})$

المرايا المغناطيسية

ظهرت مبكرًا أجهزة الحصر المغناطيسي، التي تعتمد على حصر أو مصيدة البلازما بتركيز المجال المغناطيسي، عند نهايات الأنبوبة الحاوية للبلازما. يبين الشكل (١٢) الجهاز المرآوي، الذي يعمل على حصر البلازما باستخدام المرايا المغناطيسية. أيضا ظاهرة المرايا المغناطيسية موجودة في الطبيعة، كما بالشكل (١٢) الغلاف المغناطيسي للكواكب الشمسية والهالة الشمسية؛ حيث تتواجد حلقات مغناطيسية بمجالات قوية عند النهايات. تقارب المجال المغناطيسي يعني زيادة في شدة المجال، تؤدي إلى انحدار في الضغط المغناطيسي، وهذا يحقق قوة الاصطياد أو الحصر.

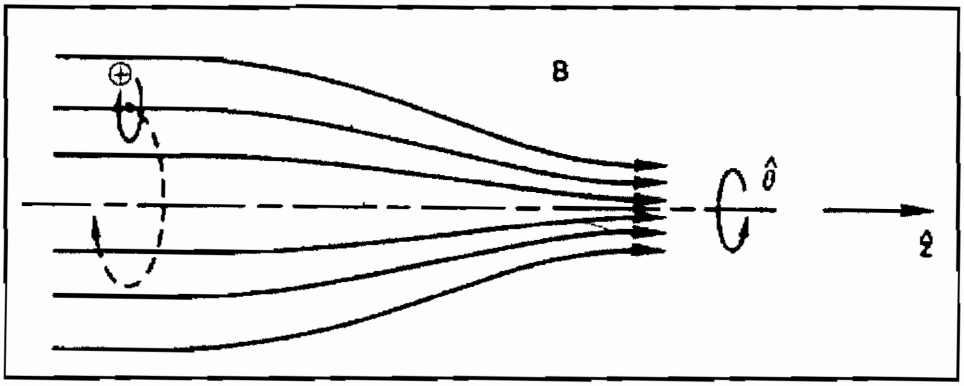


الشكل (١٢): المرايا المغناطيسية.

ماذا يحدث عند دخول جسيم مشحون منطقة مجال مغناطيسي متقارب؟

نفرض أن شدة المجال القوي (شكل ١٣) هو B_1، والمجال الضعيف في المنتصف هو B_0، وسرعة الجسيم عند تلك المواضع هي v_0 , v_1 على الترتيب عندئذ حفظ العزم المغناطيسي μ

$$\mu = \frac{m v_{0\perp}^{2}}{2B_0} = \frac{m v_{1\perp}^{2}}{2B_1}$$



شكل (١٣): رسم تخطيطي يوضح خطوط القوى في جهاز المرايا المغناطيسية.

كلما زادت شدة المجال المغناطيسي B، زادت مركبة السرعة العمودية للجسيم ويتحرك اكثر عموديًا على المجال B. عندما يؤول المجال الكهربي إلى الصفر، تزداد الطاقة الكلية للجسيم، وتزداد بالتالي السرعة العمودية $v_\perp$، وتقل السرعة الموازية للمجال $v_\parallel$، ويتباطأ الجسيم في حركته على طول المجال

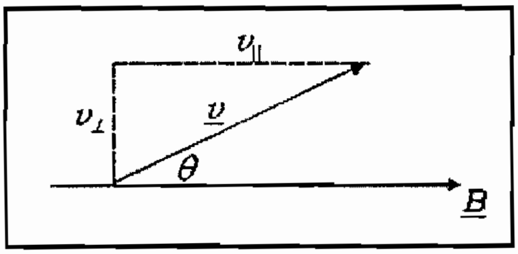
وتقل السرعة بزيادة شدة المجال؛ حتى تصبح مساوية للصفر عند تقارب المجال؛ أي عند النقطة B_1، تكون $v_{1,\parallel}=0$ وبالتالي عند تلك النقطة:

$$v_1^2 = v_{1,\perp}^2 = v_0^2$$

ومن العلاقات السابقة، وقانون حفظ الطاقة، نحصل على:

$$\frac{B_0}{B_1} = \frac{v_{0,\perp}^2}{v_{1,\perp}^2} = \frac{v_{0,\perp}^2}{v_0^2} \qquad (2.34)$$

الجزء الأيمن من العلاقة السابقة هو مربع جيب الزاوية، مابين متجه السرعة الجسيم والمجال المغناطيسي، كما بالشكل (١٤).



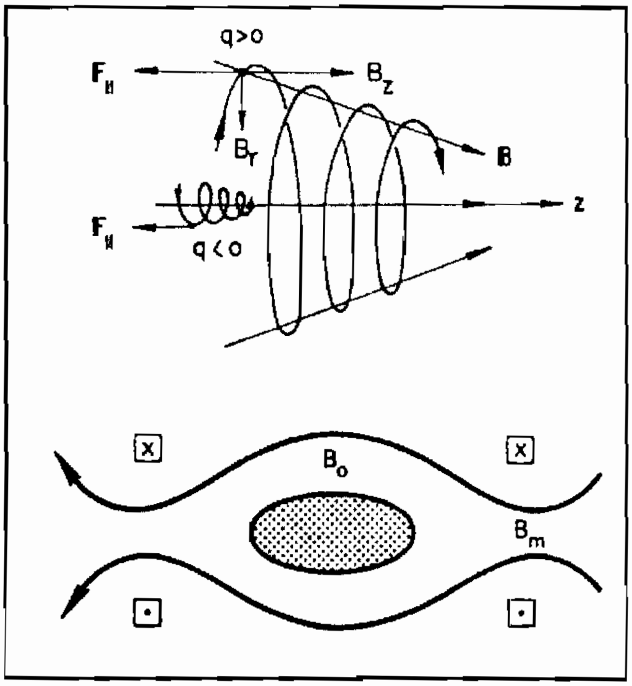
شكل (١٤)

الزاوية θ تسمى زاوية الخطوة للجسيم وبالتالي:

$$\frac{B_0}{B_1} = \sin^2\theta \qquad (2.35)$$

إذا كان الجسيم يملك زاوية الخطوة θ عند المجال B_0، كما بالمعادلة السابقة، فإننا نجد فعل قوة المرآة تعني $v_\parallel = 0$ عند B_1، وبالتالي عند النقطة B_1، لايتحرك الجسيم في اتجاه B، ولكن بما أن قوة المرآة لاتزال تعمل في اتجاه B، فإن الجسيم سوف يرتد، ويأخذ دورة كاملة ذهابًا وإيابًا، وهذا يعرف بالمرآة المغناطيسية. نعتبر أن المجال المغناطيسي يتغير بانتظام من أقل قيمة للمجال B_0 الى أقصى قيمة له B_m، كما بالشكل (١٥)؛ حيث نجد أن نسبة المرآة R_m تعرف على أنها النسبة بين أقصى قيمة للمجال B_m إلى أقل قيمة B_0:

$$R_m = \frac{B_m}{B_0} \qquad (2.36)$$



الشكل (١٥)

وسوف ترتد الجسيمات إذا كانت زاوية خطوتها في منطقة المجال الضعيف هي:

$$\theta \geq \theta_m = \sin^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{R_m}}\right) \qquad \textbf{(2.37)}$$

بالنظر إلى انجراف الجسيمات، عندما يصنع ∇B (انحدار المجال) زاوية مع المجال B، التي تصادفنا في المرآيا المغناطيسية؛ حيث تزداد شدة المجال على طول اتجاه خطوط القوى، كما بالشكل (٢). ويمكن اصطياد الجسيم المشحون داخل الطوبولوجية المغناطيسية، تحت ظروف معينة.

دعنا نصف رياضيا تركيب المجال:

المجال ينفرج عندما تحقق العلاقة $\nabla.B = 0.$

في الإحداثيات الأسطوانية، تكتب هذه العلاقة:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial r B_r}{\partial r} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0. \qquad \textbf{(2.38)}$$

محققة $\partial B_z/\partial z$ لاتتغير كثيرًا مع r :

$$rB_r = -\int_0^r r\frac{\partial B_z}{\partial z}\mathrm{d}r \approx -\frac{r^2}{2}\frac{\partial B_z}{\partial z} \qquad (2.39)$$

$$B_r = -\frac{r}{2}\frac{\partial B_z}{\partial z}. \qquad (2.40)$$

أى عدم تجانسية نصف قطريــة لــدى B_r تعطــي انــسياقًا ســمتيًا، هــو $B_z\hat{k}\times\nabla B_r\hat{r}$ حول محور التماثل (شكل ٢)، ولكن لايوجد انسياق نــصف قطري.

ما تأثير قوة لورنتز في المجال الإسطواني؟

$$\begin{aligned} F = qv\times B &= \begin{vmatrix} \hat{r} & \hat{\theta} & \hat{z} \\ v_r & v_\theta & v_z \\ B_r & 0 & B_z \end{vmatrix} \\ &= \hat{r}(qv_\theta B_z) - \hat{\theta}q(v_r B_z - v_z B_r) - \hat{z}(qv_\theta B_r). \end{aligned} \qquad (4.41)$$

للتبسيط، نعتبر جسيمًا يدور على طول المحور $(r = r_{\mathrm{L}})$ ؛ بمعنى إهمــال انسياقات انحدار المجال، والقوة المحورية هي:

$$\begin{aligned} F_z &= v_\theta r_{\mathrm{L}}\frac{q}{2}\frac{\partial B_z}{\partial z} \\ &= \mp v_\perp r_{\mathrm{L}}\frac{q}{2}\frac{\partial B_z}{\partial z} \qquad \text{ions and electrons} \\ &= \mp\frac{qv_\perp^2}{2\omega_c}\frac{\partial B_z}{\partial z} \\ &= -\frac{mv_\perp^2}{2B}\nabla_\parallel B \end{aligned}$$

حيث $v_\perp$ السرعة السيكلترونية. وبالتعبير بأصطلاح العزم المغناطيسي :

$$F_\parallel = -\mu\nabla_\parallel B. \qquad (4.42)$$

هذه القوة بعيدة عن زيادة المجال B، وهي متساوية للجسيمات ذات الطاقــة المتساوية (لاتعتمد على الشحنة). الجسيم المتحرك من منطقة المجال الضعيف

إلى المجال القوى ترى التغير الزمني للمجال المغناطيسي. ومن ناحية ثانية، يبقى العزم المغناطيسي ثابتًا أثناء الحركة، محققًا معدل تغير بطئ. وبما أن μ ثابتة للحركة، عندئذ:

$$\frac{v_{\perp 0}^2}{B_0} = \frac{v_{\perp m}^2}{B_m} \qquad (2.43)$$

حيث يرجع الرمز السفلي 0 إلى ظروف المجال الضعيف، والرمز السفلي m للمجال القوي في منطقة المرآيا. إذا كان $B_m > B_0$، عندئذ $v_{\perp m} > v_{\perp 0}$. ومن ناحية ثانية، إذا كان المجال B لايعمل معنى هذا أن طاقة الحركة الكلية للجسيم تبقى دون تغير $K = m(v_{\parallel 0}^2 + v_{\perp 0}^2)/2$، تكون ثابتة. وبناءً على ذلك، يجب أن نملك $v_{\parallel m} < v_{\parallel 0}$ وسرعة الجسيم المحورية تقل كلما تحرك الجسيم، داخل منطقة المجال القوي.

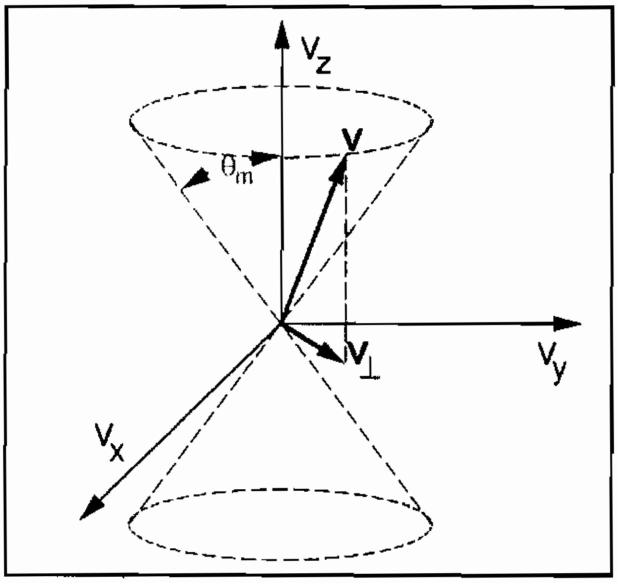
السرعة المحورية تعطى:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_{\parallel}^2 &= K - \frac{1}{2}mv_{\perp}^2 \\ &= K - \mu B \\ \Rightarrow \qquad v_{\parallel} &= \left[\frac{2}{m}(K - \mu B)\right]^{1/2} \qquad (2.44) \end{aligned}$$

إذا كان المجال B عاليًا جدا، يتوقف الجسيم وتعود القوى $F_{\parallel}$ للجسيم داخل نطاق البلازما، في منطقة المجال الضعيف (انظر الشكل ١٥) لا يتم اصطياد كل الجسيمات بالمرآة. عند نقطة المرآة ظروف المعادلة (2.43) تتطلب:

$$\begin{aligned} \frac{B_m}{B_0} &= \frac{v_{\perp m}^2}{v_{\perp 0}^2} \\ &= \frac{v_{\parallel 0}^2 + v_{\perp 0}^2}{v_{\perp 0}^2} \\ &= \frac{1}{\sin^2\theta_m} \qquad (2.45) \\ &\equiv R_m \qquad \text{Mirror ratio} \qquad (2.46) \end{aligned}$$

حيث R_m نسبة المرآة. ونستخدم حقيقة حفظ طاقة الحركة K' ، والزاوية θ_m مبينة بالشكل (١٦). تخترق الجسيمات التي لها $\theta < \theta_m$ (التي تملك سرعة طولية عالية) المرآة وتفقد. وتعنى الجسيمات التي ليست في مخروط الفقد أنها تملك $\theta > \theta_m$، وتكون محصورة (يتساوى كل من الأيونات والإلكترونات). بعد استنزاف مخاريط الفقد، تتشتت الجسيمات بالتصادم. ومن المعلوم أن تردد التصادم للإلكترونات أكبر من الأيونات، وبالتالي يكون الفقد في الألكترونات أكبر، ومن ثم البلازما تحتاج إلى جهد موجب)



شكل (١٦): الجسيمات التي لها سرعات في مخروط الفقد مميزة الفقد.

مخروط الفقد هو احتمالية فقد الجسيم من الزجاجة المغناطيسية؛ أي إن الجسيمات التي لها زاوية خطوة خارج مخروط الفقد يتم اصطيادها. وتعرف زاوية الخطوة للجسيم المشحون بأنها الزاوية بين متجه سرعة الجسيم والمجال المغناطيسي المحلي، كما بالشكل (٦). يدور متجه السرعة حول خط المجال المغناطيسي بزاوية θ تعطى:

$$\tan \theta = \frac{v_\perp}{v_{11}} \qquad \textbf{(2.47)}$$

الجسيمات التي يتم اصطيادها تحقق العلاقة:

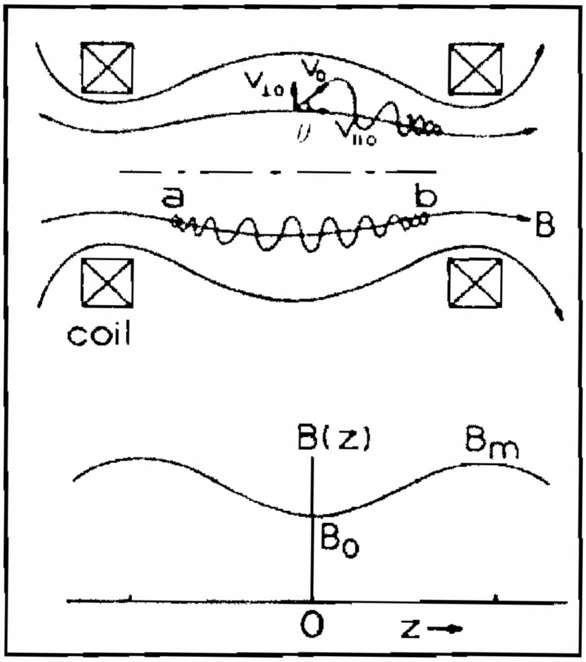
$$\tan\theta \geq \frac{1}{\sqrt{R_m - 1}} \qquad \textbf{(2.48)}$$

حيث $R_m = {}^{B_m}\!/_{B_O}$

من ناحية ثانية، الجسيمات التي لها متجهات سرعة، وتقع داخل مخروط الفقد، لايمكن حصرها، وتحقق العلاقة:

$$\tan\theta \prec \frac{1}{\sqrt{R_m - 1}} \qquad \textbf{(2.49)}$$

يصبح مخروط الفقد أكثر ضيقًا كلما زادت نسبة المرآة R_m. سوف تفقد الجسيمات التي لاتعاني من تصادمات داخل المصيدة، ولها سرعات متجهة داخل المخروط. أما الجسيمات التي تعاني من تصادمات فإنها تقذف داخل وخارج مخروط الفقد؛ نتيجة لتغير اتجاهات سرعاتها، وبالتالي يحدث تسرب مستمر للجسيمات من المصيدة، وتعتمد سرعة الهروب على تردد التصادم، ومن ثم تكون الإلكترونات أكثر هروبًا من الأيونات.



شكل (١٧)

نفرض أن جسيمًا مشحونًا (أيون) بدأ من مركز مجال المرآة B_0 بسرعة طولية $v_{11O} = 3*10^6 m/s$، وسرعة عمودية $v_{\perp O} = 2*10^6 m/s$، ونسبة المرآة $R_m = 3$ هل يحدث ارتداد للجسيم؟ وما قيمة R التي تسبب الارتداد؟

بما أن $\tan\theta = \frac{v_\perp}{v_{11}}$ حيث θ هي زاوية الخطوة بين سرعة الجسيم v والمجال B، فإنه بالتعويض بقيم السرعات الطولية والعمودية، نجد قيمة زاوية الخطوة $\theta = 33.69^\circ$، ومقارنتها بزاوية مخروط الفقد، التي تعطى بالعلاقة $\sin\theta_m = \frac{1}{\sqrt{R_m}}$، كما نحصل على قيمة الزاوية $\theta_m = 35.26^\circ$، ونلاحظ أن قيمة زاوية الخطوة أقل من زاوية مخروط الفقد، وبالتالي يقع الجسيم داخل مخروط الفقد؛ أي إنه ينفذ من المرآة. ولكي يحدث ارتداد، لابد من تحقيق الشرط: $\theta \ge \theta_m \equiv \sin^{-1}(\frac{1}{\sqrt{R_m}})$ اي $R_m = \frac{1}{\sin^2\theta_m}$، عندئذ

$$R_m = 3.25$$

مدارات الجسيمات في مجال التوكاماك

يتغير المجال المغناطيسي الحلقي في التوكاماك عكسيًّا مع نصف القطر الرئيسي. ولكي يتضح ذلك، دعنا نطبق قانون أمبير لحلقة مغلقة، تحيط بالوعاء، ونفرض أن هذه الحلقة تحيط بعدد N من ملفات المجال الحلقي كل منها يحمل تيار I في الاتجاه نفسه، عندئذ:

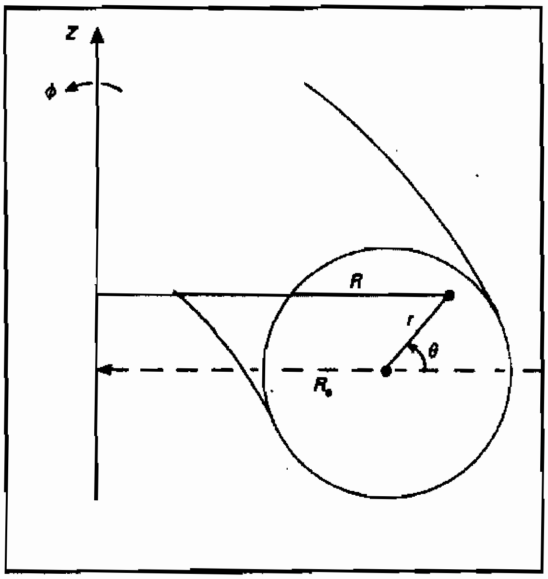
$$\oint \mathbf{B}.\mathrm{d}\mathbf{l} = 2\pi RB = \mu_0 NI$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi R}. \qquad \textbf{(2.50)}$$

دع $\epsilon = r/R_0$ حيث هو نصف قطر المحور المغناطيسي، وشدة المجال عند نقطة معينة في الوعاء هي:

$$B = B_0(1 - \epsilon\cos\theta) \qquad \textbf{(2.51)}$$

حيث θ زاوية الاحداثيات القطبية بالنسبة للمحور المغناطيسي، وهي شدة المجال المغناطيسي على المحور (انظر الشكل ١٨).



الشكل (١٨): يوضح المخطط الهندسي للمغناطيسية الحلقية.

إذا تتبعنا المسار الحلزوني على طول المجال، بدأ من خارج الوعاء، وتحرك تجاه محور الوعاء (للداخل)، يزداد المجال المغناطيسي؛ ونتيجة لذلك يـــزداد تردد بعض الإلكترونات (عند النقاط P و Q ، كما بالشكل ١٩) بتأثير المرآة. يبين مسقط انجراف مركز التوجيه داخل المستوى $R\text{–}z$ شكل مدار الموزة. بين نقاط الارتداد، يوجد انجراف إلى أعلى نتيجة للانحناء وانحدار المجـــال. نموذجيًا عرض الموزة لنظام التوكاماك $\lesssim 0.1a$ ؛ حيث a هو نصف القطـــر الأصغر. سوف تخترق الجسيمات بسرعة طولية عالية الجدار المغناطيـــسي، وتكمل الدائرة الحلقية، وهذه تعرف باسم الجسيمات المارة (العابرة).

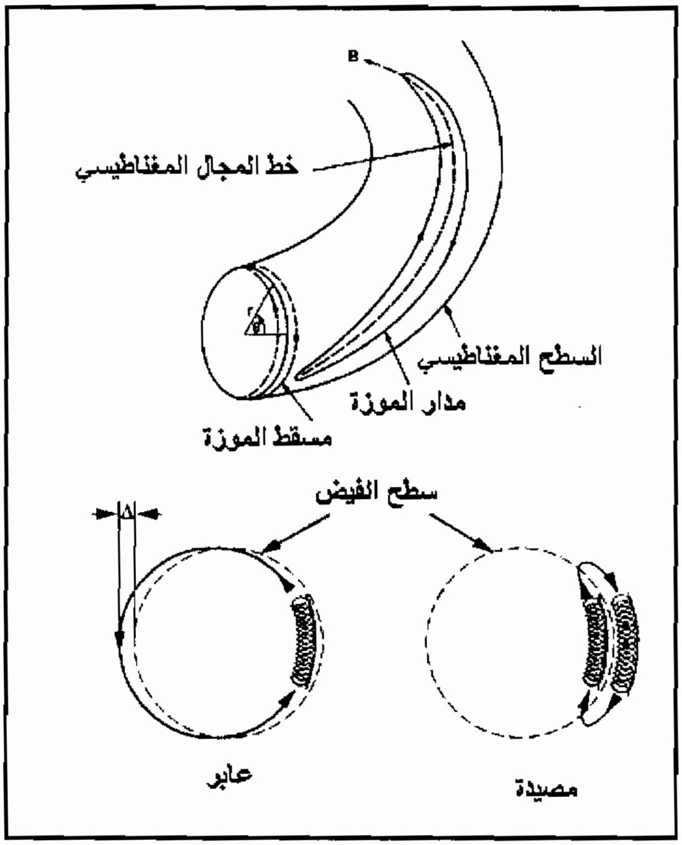
المدارات المارة (العابرة)

كلما تحرك الجسيم حلقيا بحرية: فإن مسقط مداره داخل المستوى $R\text{–}z$ يعطى:

$$\frac{dx}{dt} = -\Omega z \qquad \frac{dz}{dt} = \Omega x + v_z \qquad (2.52)$$

حيث $x = R - R_0$ سرعة النجراف العمودية على Z تعطى

$$v_z = \frac{m}{2qB_\phi R}(2v_\parallel^2 + v_\perp^2). \qquad (2.53)$$



الشكل (١٩)

حيث $\Omega = \mathrm{d}\theta/\mathrm{d}t$ السرعة الزاوية لمدار الجسيم، الساقط على المستوى القطبي. ينهض دوران هذا المستوى من لولبة خط المجال المغناطيسي. ومعدل الحلزنة لخط المجال تعطى:

$$\frac{r\mathrm{d}\theta}{B_\theta} = \frac{R\mathrm{d}\phi}{B_0}$$

وهي تميز بعدد اللف أو عامل الأمان الذي يعطى بالعلاقة:

$$q(r) = \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}\theta} = \frac{rB_0}{RB_\theta} = \epsilon\frac{B_0}{B_\theta}. \qquad (2.54)$$

في أنظمة التوكاماك q، تقع في المدى $0.7 < q(r) < 3 \text{ or } 4$ ، ويعطى تردد الدوران القطبي بدلالة q:

$$\Omega = \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{q(r)}\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = \frac{v_\phi}{q(r)R} \qquad (2.55)$$

حزام إشعاع ڤان ألن

أحزمة ڤان ألن، نطاقان من الجسيمات المشحونة كهربائيًّا، تحيطان بالسطح الأعلى للكرة الأرضية. وتُسمى أيضاً الأحزمة الإشعاعية. وقد سميت الأحزمة باسم مكتشفها چيمس ألفرد ڤان ألن، عالم الفيزياء الأمريكي، الذي اكتشفها في عام 1958م، خلال عمله في رصد معلومات من القمرين الصناعيين إكسبلورر وبايونير. وتحيط الأحزمة بالكرة الأرضية إحاطة السوار بالمعصم؛ حيث يرتفع الحزام الداخلي بين حوالي 1000 و5000 كم فوق سطح الأرض، بينما يقع الحزام الخارجي بين حوالي 15000 و25000 كم.

يتكوّن الإشعاع الموجود بهذه الأحزمة من تركيز عالٍ من الجسيمات المشحونة بالكهرباء، مثل: البروتونات والإلكترونات. ويجذب المجال المغنطيسي الأرضي هذه الجسيمات، ويوجهها نحو الأقطاب المغنطيسية. وتدور الجسيمات المنجذبة دوراناً لولبيًّا على خطوط وهمية، في المجال المغنطيسي، وتنحرف خطوط المجال الوهمية هذه من القطب المغنطيسي الشمالي إلى القطب المغنطيسي الجنوبي. وعندما تقترب الجسيمات من أحد القطبين، تعترضها خطوط المجال الوهمية، وتعكسها نحو القطب الآخر. وهذه الظاهرة تجعل الجسيمات داخل الأحزمة تتأرجح بين الأقطاب.

الحزام الداخلي

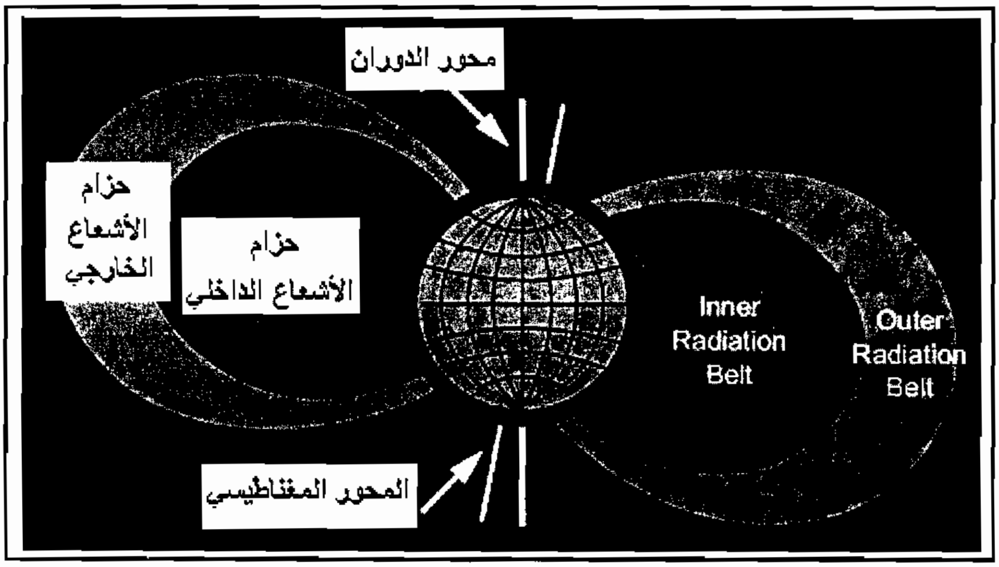
يجذب الحزام الداخلي الجسيمات المنطلقة من الغلاف الجوي بوساطة أشعة كونية، وهي جسيمات ذات طاقة عالية في الفضاء الخارجي.

الحزام الخارجي

يجذب الحزام الخارجي الجسيمات من الرياح الشمسية، وهي جسيمات مشحونة بالكهرباء، تتدفق باستمرار من الشمس، ومن اللهب الشمسي وهي انفجارات فجائية، تحدث على سطح الشمس، ويمزق هذا النشاط الشمسي الكبير الأحزمة، ويؤدي إلى عواصف مغنطيسية. وتتداخل اضطرابات الأحزمة أيضاً مع استقبال الراديو، وتسبب موجات في خطوط القدرة الكهربائية، بالإضافة إلى تكوين الأورورات.

وتحاط الكواكب الأخرى، مثل المشتري وزُحل وأورانوس (سابع الكواكب السيارة) ونبتون أيضًا، بمجالات مغنطيسية مثل كوكب الأرض. وقد أثبتت

الرحلات الفضائية، في العقدين الثامن والتاسع من القرن العشرين الميلادي، أن لهذه الكواكب أحزمة إشعاعية أيضاً.



الشكل (٢٠): حزام إشعاع ڤان ألن.

يستخدم مصطلح "المجال المغناطيسي" للإشارة إلى نوعي مجالات مختلفين، يُرمز لهما بـ"B" و"H". وهناك عديد من الأسماء البديلة لكليهما، ولكن لتجنب الخلط والفوضى استخدُم، في هذا المقال، اسما "مجال-B" و"مجال-H" فقط، واستخدم مصطلح "مجال مغناطيسي" للإشارة إلى كليهما معاً.

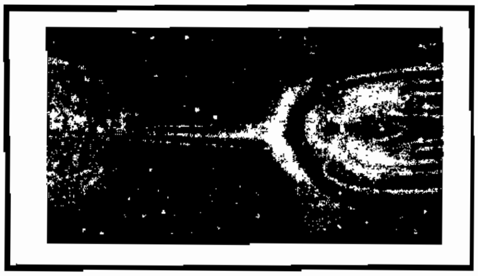
يُمكن تعريف "مجال-B" بعديد من الطرق المتشابهة المرتكزة على تأثيراته على محيطه. مثلاً، جسيم يملك شحنة كهربائية (q)، يتحرك في "مجال-B" بسرعة ما (v)، يخضع لقوة ما (F)، يُسمّى قوة لورنتز. معادلة قوة لورنتز هي:

$$F = q(v \times B) \qquad \textbf{(2.56)}$$

حيث إن × هو جداء اتجاهي. وحسب قانون لورنتز؛ فالمجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الكهربائي، ليس سوى مجال ناشئ عن الشحنات المتحركة، ولهذا يزول المجال المغناطيسي بتوقف الشحنات عن الحركة (انقطاع التيار).

يُقاس "مجال-B" بنظام الوحدات الدولي بوحدات: التسلا والغاوس

المجال المغناطيسي الأرضي



شكل (٢١): المجال المغناطيسي للأرض، والذي يمنع الرياح الشمسية من الوصول إلى الغلاف الجوي.

الأرض هي الكوكب الوحيد من الكواكب الصخرية في النظام الشمسي، التي تملك مجالاً مغناطيسيًّا، وهو يتشكل بفعل الصهارة المشحونة كهربائيًّا، التي تتحرك داخل الأرض في طبقة الدثار (طبقاً لقاعدة أن التيار الكهربائي يولّد مجالاً مغناطيسيًّا). ولهذا المجال المغناطيسي أهمية كبيرة للحياة على الأرض؛ لأن الرياح الشمسية تسبب تآكل الغلاف الجوي (وهذا ما يحدث في بقية الكواكب الصخرية في النظام الشمسي؛ حيث يتآكل جزء كبير من أغلفتها الجوية). بينما يعمل المجال المغناطيسي للأرض على حمايتها من الرياح الشمسية، ويمنع وصولها إلى الغلاف الجوي. إضافة إلى ذلك، لولا المجال المغناطيسي، لما وُجد اختراع البوصلة (لأن البوصلة تتجه نحو القطب المغناطيسي الشمالي للأرض)، والتي كانت لها أهمية كبيرة، عبر العصور في معرفة الاتجاهات، أثناء السفر والترحال.

الفصل الثالث
الهيدروديناميكا (الموائع المتحركة)

أهم البارامترات الأساسية في ديناميكا الموائع، هي: الضغط – الكثافة – درجة الحرارة وسرعة سريان المائع، وهي كمية متجهة، لها مقدار واتجاه، أما كل من الضغط – الكثافة – درجة الحرارة، فإنها كميات قياسية؛ أي لها مقدار وليس لها اتجاه، وجميع هذه البارامترات تملك خاصية النقطة بمعنى أنها تختلف من نقطة إلى أخرى داخلة المائع.

أنواع السريان

سريان مستمر (continuous flow) وسريان حر (free flow)

لحدوث السريان المستمر للمائع، لابد من تحقيق الشرط $(\lambda \prec d)$؛ أي ان متوسط طول المسار الحر أقل من أبعاد النظام (طوله)، ومعنى هذا أن التصادمات تحدث على فترات قصيرة، ويعرف هذا بالسريان المستمر. أما السريان الحر، فإنه يتحقق بالشرط $(\lambda \succ d)$؛ أي إن متوسط طول المسار الحر أكبر من أبعاد النظام (طوله)، ومعنى هذا أن التصادمات تحدث على فترات متباعدة.

السريان اللزج (viscous flow) وغير اللزج

السريان اللزج يعني أن جزيئات المائع تتحرك عشوائيًّا؛ مما يؤدي لنقل كمية الحركة والكتلة من موضع إلى موضع آخر، ونتيجة لهذا الانتقال يحدث انتشار لكل من الكتلة – اللزوجة والتوصيل الحراري، أما السريان غير اللزج، فإنه لايوجد احتكاك في السريان.

تنشأ الظواهر الفيزيائية للزوجة والتوصيل الحراري عن انتقال كمية الحركة والطاقة عبر الحركة الجزيئية العشوائية؛ فمن المعلوم أن كل جزئ له كمية حركة وطاقة، تنتقل مع الجزيء من مكان إلى آخر في المائع، قبل تصادمه بجزيء آخر، وبحدوث التصادم يحدث انتقال لكمية الحركة، وهذا التأثير

الماكروسكوبي يسمى لزوجة، أما عن انتقال الطاقة من جزئ الى أخر، فإنه أيضًا تأثير ماكروسكوبي، ويسمى التوصيل الحراري. وبالتالي نجد اللزوجة والتوصيل الحراري توصف بظواهر الانتقال. وهناك معنى للزوجة في معامل اللزوجة (μ)؛ حيث يتناسب إجهاد القص ξ طرديًّا مع ميل السرعة $\nabla.v$:

$$\xi \propto (\nabla.v)$$

$$\xi = \mu(\nabla.v)$$

$$\nabla.v = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

أيضًا ثمة معنى للتوصيل الحراري في معامل التوصيلية الحرارية κ (μ)؛ حيث يتناسب معدل الحرارة الموصلة لكل وحدة مساحة q° طرديا مع ميل درجة الحرارة $\nabla.T$

$$q^{\circ} = -\kappa\nabla.T$$

السريان المضغوط والغير مضغوط

يقال إن السريان مضغوط، إذا كانت كثافة المائع متغيرة، ويقال السريان غير مضغوط إذا كانت كثافة المائع ثابتة.

يقال إن المائع لزج ومضغوط، إذا كان تحقق الشرط $M \geq 0.3$ حيث M عدد ماخ (Mach).

أما إذا كان $M \prec 0.3$، فإن السريان عندئذ غير مضغوط.

نطاق عدد ماخ (Mach)

سرعة سريان المائع أقل من سرعة الصوت، إذا كان $M \prec 1$ (Subsonic)، وتكون سرعة سريان المائع مساوية لسرعة الصوت إذا كان $M = 1$ (Sonic)، وتكون سرعة سريان المائع أكبر من سرعة الصوت، عندما تكون $M \succ 1$ (Supersonic)، وتكون أكبر بكثير من سرعة الصوت، عندما تكون $M \succ 5$ (hypersonic)، وعندما تكون سرعة السريان أكبر من سرعة الصوت، تتولد موجة الصدمة.

المعادلات الأساسية لديناميكا الموائع

١- معادلة الاستمرارية

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho v) = 0$$

وهذه المعادلة تحقق قانون حفظ الكتلة في حالة السريان غير الثابت unsteady، وهذا يعني أن الكثافة ρ تكون دالة في الفراغ والزمن $\rho = \rho(x,y,z,t)$. أما في حالة الثبات steady state، تكون الكثافة ρ دالة في الفراغ فقط $\rho = \rho(x,y,z)$؛ أي $\partial/\partial t = 0$، وتصبح معادلة الاستمرارية في الصورة الآتية

$$\nabla.(\rho v) = 0$$

٢- معادلة كمية الحركة

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla.(\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial t} + \rho f_x + (\zeta_x)_{visc}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla.(\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial t} + \rho f_y + (\zeta_y)_{visc}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla.(\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial t} + \rho f_z + (\zeta_z)_{visc}$$

وتسمى هذه المعادلة Navier - Stokes، وهذه المعادلة تتحقق في السريان اللزج (viscous flow)، وتعرف $\zeta_{x,y,z}$ بمركبات إجهادات القص اللزجة، أما $\rho f_{x,y,z}$ هي مركبات القوى (قوة كهرومغناطيسية – جاذبية وغيرها)، أما $\partial p/\partial t$ هي قوى الضغط.

في حالة السريان غير اللزج، تصبح المعادلة:

$$\nabla.(\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\nabla.(\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\nabla.(\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial z}$$

وهذه المعادلة تسمى معادلة أويلر Eulers.

٣- معادلة الطاقة

في حالة عدم الثبات unsteady state تكتب معادلة الطاقة في الصورة الآتية:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho(e+v^2/2)]+\nabla.[\rho(e+v^2/2)v]=\rho q^{\cdot}-\nabla.(pv)+\rho(f.v)+Q^{\cdot}_{visc}+W^{\cdot}_{visc}$$

الطرف الأيسر للمعادلة عبارة عن شقين: الشق الأول يوضح معدل التغير الزمني للطاقة الكلية داخل الحجم v؛ نتيجة تغيرات مجال السريان، والشق الثاني هو معدل السريان للطاقة الكلية (الداخلية e. والحركية $v^2/2$، عبر سطح التحكم control surface).

أما الطرف الأيمن من المعادلة، فإنه يتكون من أربعة أجزاء: الأول يمثل معدل التسخين الحجمي، والثاني يمثل معدل الشغل المبذول على المائع الناشئ عن قوة الضغط، والثالث يمثل معدل الشغل المبذول على المائع الناشئ عن قوى الأجسام، أما الرابع فهو يمثل معدل الحرارة الناشئة عن تأثير اللزوجة، والخامس يمثل معدل الشغل المبذول على المائع الناشئ عن إجهاد القص؛ نظرًا لأن السريان لزج.

في حالة الثبات steady state، فإن هذا يعني $\partial/\partial t = 0$، وأن السريان غير اللزج inviscid يعني $Q^{\cdot}_{visc}=0$، وأيضًا $W^{\cdot}_{visc}=0$. أما السريان الأديباتي adiabatic يحقق $q^{\cdot}=0$، وبإهمال قوى الأجسام $f=0$، تصبح معادلة الطاقة عندئذ في الصورة الآتية:

$$\nabla.[\rho(e+v^2/2)v]=-\nabla.(pv)$$

ونلاحظ أن المعادلات الثلاثة (معادلة الاستمرارية - معادلة كمية الحركة - معادلة الطاقة) تحتوي على أربعة متغيرات أساسية، هي: الكثافة ρ، والضغط p، والسرعة v، والطاقة الداخلية e، وبالتالي فإننا نحتاج لمعادلة رابعة، وهي:

$$e=C_v T$$

حيث T هي درجة الحرارة وهي متغيرة وهذا يتطلب معادلة خامسة وهي

$$P=\rho RT$$

حيث R ثابت الغاز العام.

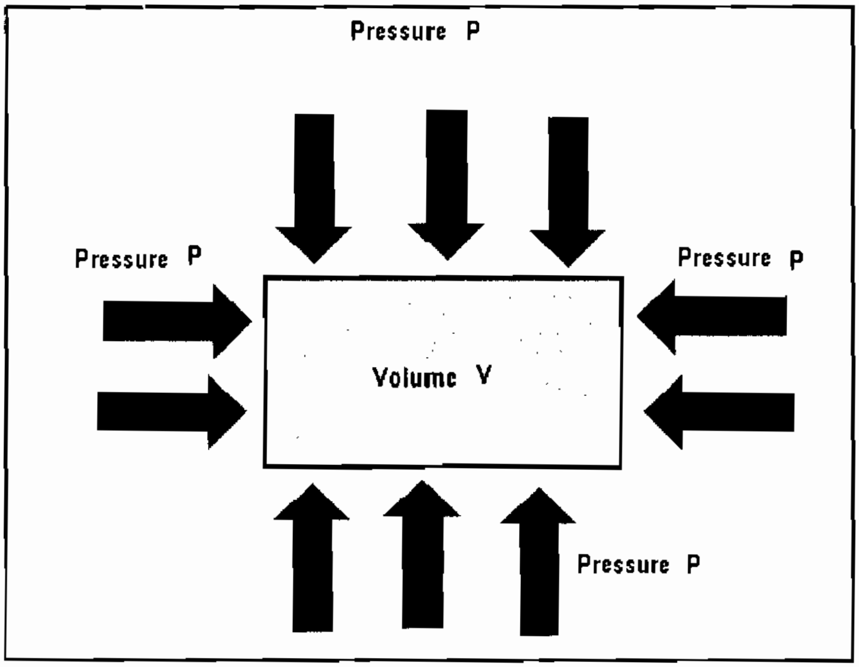
السريان المضغوط Compressible flow

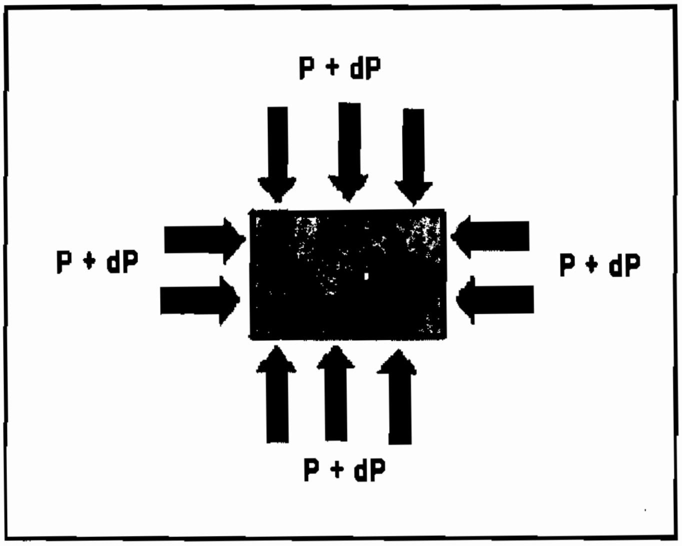
في حالة السرعة العالية للسريان، تصبح الكثافة متغيرة، ويكون بالتالي السريان مضغوطًا والمفهوم الفيزيائي لدى السرعة العالية لسريان المائع أنه يحدث تحول للطاقة الحركية إلى طاقة داخلية للمائع، تعمل على تغير درجة حرارته.

الانضغاطية (τ) Compressibility

$$\tau = -\frac{1}{v}\frac{dv}{dp}$$

وهذه العلاقة تعني حدوث تغير جزئي في حجم المائع، لكل وحدة تغير في الضغط، ويقال إن السريان مضغوط عندما يتحقق $M \geq 0.3$ ، ويتضح الشكل الفيزيائي لهذه العلاقة من الرسم المبين بالشكل (١). الانضغاطية في الغازات أكبر منها في الموائع.





شكل (١)

موجات الصدمة

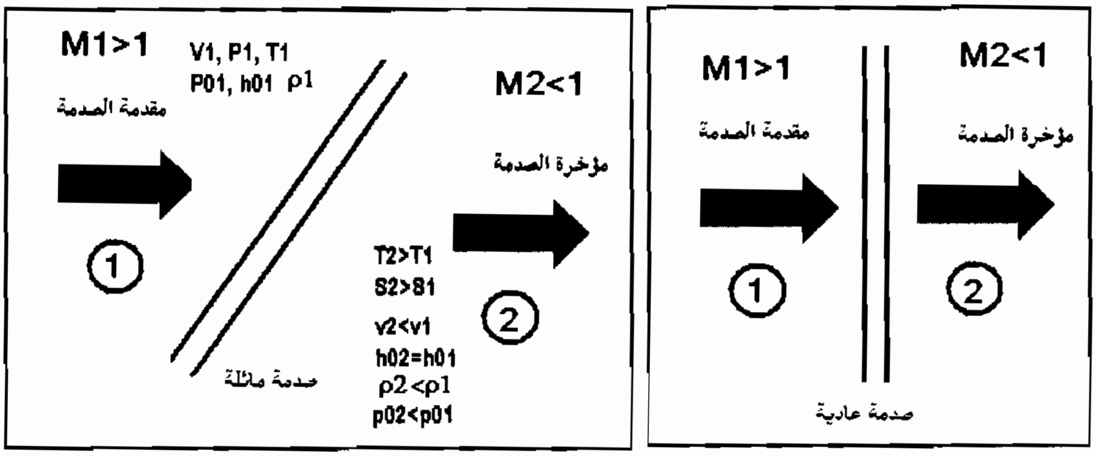
تتولد موجات الصدمة نتيجة سريان المائع بسرعة أكبر من سرعة الصوت؛ أي إن عدد ماخ أكبر من واحد (عدد ماخ هو النسبة بين سرعة سريان المائع وسرعة الصوت)

وموجة الصدمة إما أن تكون متعامدة (قائمة)، أو مائلة كما بالشكل (٢).

وفي الحالتين، المائلة والعمودية، فإن موجة الصدّمة هي عملية انضغاطية سريعة، يزداد الضغط بصورة متقطعة عبر الموجة. ويكون السريان عبر موجة الصدمة اديباتيكي (إضافة حرارة إلى النظام دون نقص منه)، ويكون الأنثالبي الكلي ثابتًا h_0:

$$h_0 = h + v^2/2$$

حيث h هو الإنثالبي الإستاتيكي، و $v^2/2$ هي طاقة الحركة.



شكل (٢)

أيضا في الحالتين المائلة والعمودية لموجة الصدمة، تكون سرعة السريان في مقدمة موجة الصدمة أكبر من سرعة الصوت (supersonic)، ولكن في مؤخرة الصدمة العمودية تكون سرعة السريان أقل من سرعة الصوت، أما مؤخرة الصدمة المائلة، تكون سرعة السريان أكبر من سرعة الصوت، ولكن سرعة السريان في مؤخرة موجة الصدمة أقل من سرعة السريان، في مقدمة الصدمة.

موجة الصدمة العمودية

توجد حقائق فيزيائية نحو السريان عبر موجة الصدمة العمودية، هي:

١- السريان يكون ثابتًا $\left({\partial}/{\partial t}=0\right)$.

٢- السريان يكون إديابتيكيًا $\left(q^{\cdot}=0\right)$ $q=const.$ ؛ أي إن النظام لا يكتسب ولا يفقد حرارة. ولكن إذا زادت درجة الحرارة عبر الصدمة، فذلك ليس معناه اكتساب حرارة إلى النظام، ولكن يحدث تحويل جزء من طاقة الحركة إلى طاقة داخلية، تعمل على تغيير درجة الحرارة عبر الصدمة.

٣- لا يوجد أي تأثير لدى اللزوجة.

٤- لا توجد قوى الأجسام $\left(f=0\right)$.

المعـــــادلات الأساســـــية لموجة الصدمة العمودية

معادلة الاستمرارية:

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$$

معادلة كمية الحركة:

$$p_1 + \rho_1 u_1^2 = p_2 + \rho_2 u_2^2$$

معادلة الطاقة:

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_2 + \frac{u_2^2}{2}$$

معادلة الإنثالبي:

$$h_2 = C_p T_2$$

معادلة الحالة:

$$p_2 = \rho_2 R T_2$$

من هذه المعادلات، توجد خمسة متغيرات $(\rho_2, u_2, p_2, h_2, T_2)$، يمكن الحصول عليها بحل هذه المعادلات.

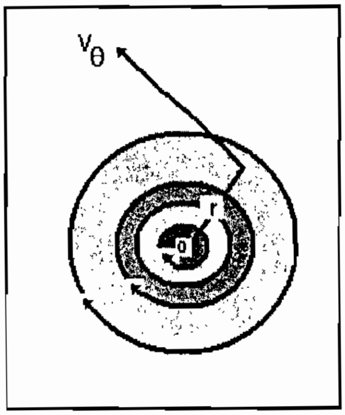
السريان الدردور Vortex flow

في السريان الدردوري، تكون خطوط الأنسياب عبارة عن دوائر متحدة المركز حول نقطة الأصل o، كما بالشكل (٣):

$$v_\theta = \frac{const}{r} = \frac{C}{r}$$

$$v_\theta = -\Gamma / 2\pi\ r$$

حيث Γ هي شدة الدردور



شكل (٣)

البلازما كمائع

لحسن الحظ أن معظم ظواهر البلازما تفسر بنظرية نموذج المائع (two fluid model)، ولكن الفرق بين البلازما والمائع، هو أن مائع البلازما يحتوي على شحنات كهربية (أيونات وإلكترونات)، وأن التصادمات بينها غير متكــررة.. أما المائع العادي التصادمات متكررة بين الجسيمات، فتعمل على حفظها فـي عنصر المائع. وعلى الرغم من هذا الفارق، إلا أن النموذج صالح للتطبيق.

توصف التيارات الكهربية في البلازما بنموذج المائعين (أيونات وإلكترونات)، وحركة كليهما توصف بمعادلات ديناميكا المائع السابق شرحها.

نموذج المائعين (two fluid model)

نفرض أن الإلكترونات تتحرك بسرعة v_e، وأن الأيونات تتحرك بسرعة v_i، والفرق بين السرعتين $(v_i - v_e)$، وتعطى كثافة التيار j بالعلاقة:

$$j = zen_i v_i - en_e v_e \quad (1)$$

حيث ze شـحنة الأيـون، e شـحنة الإلكتـرون، والتعادليـة الكهربيـة $zn_i \approx n_e \equiv n$ وبالتالي كثافة التيار j تعطى بالعلاقة:

$$j \approx ne(v_i - v_e) \qquad (2)$$

ومن هذه العلاقة يوجد تيار طالما يوجد سرعة نسبية $(v_i - v_e)$بين الأيونات والإلكترونات، وبفرض أن السرعات ثابتة مع الزمن (steady state)، ولا يوجد مجال مغناطيسي، فإن نموذج المائعين يكون مطابقًا لقانون أوم، والذي يعنـي التطابق في التوصيلية σ، بالإضافة إلى تساوي كمية الحركة، التي تكتـسبها إلكترونات من المجال الكهربي E مع كمية الحركة، التي تفقدها بالتصادم مع الأيونات، حيث: كمية الحركة المكتسبة هي eE، والمفقودة هي $\frac{m}{\tau}(v_e - v_i)$،

حيث τ التوسط الزمني الحر بين التصادمات، وبالتساوي بين كمية الحركـة المكتسبة eE، والمفقودة $\frac{m}{\tau}(v_e - v_i)$:

$$\frac{m}{\tau}(v_e - v_i) = eE$$

$$v_i - v_e = \frac{eE}{m}\tau \qquad (3)$$

من العلاقتين (2) و (3) نحصل على العلاقة:

$$j = \frac{ne^2\tau}{m}E \qquad (4)$$

هذه العلاقة تتوافق مع قانون أوم:

$$j = \sigma\ E \qquad (5)$$

من العلاقتين (4) و (5) نحصل على العلاقة:

$$\sigma = \frac{ne^2}{m}\tau \qquad (6)$$

ومن العلاقة (6) نستنتج ان قانون أوم ينطبق على البلازما، في حالة عدم وجود مجال مغناطيسي.

في حالة عدم الثبات (unsteady state)، أي إن عمليات البلازما تعتمد على الزمن. وفي حالة عدم وجود المجال مغناطيسي الخارجي الثابت، يوجد نوع واحد من تذبذب البلازما، وهذا التذبذب كهروستاتيكي، ويعرف باسم تذبذب البلازما، ويعطى بالعلاقة:

$$\omega_{pe} = \sqrt{n_e e^2 / m_e \varepsilon_\circ} \qquad (7)$$

والتردد الطبيعي يعطى بالعلاقة:

$$f_\circ \cong 8.96\sqrt{n}\ \text{Hz} \qquad (8)$$

حيث n عدد إلكترونات لكل متر مكعب.

وهذا التردد يعرف باسم تردد البلازما أو تردد البلازما (Langmuir)، وهي كمية أساسية مميزة للبلازما حيث يمكن حساب عديد من الظواهر المختلفة في الطبيعة والمعامل؛ فنجد على سبيل المثال موجات الراديو القادمة من الهالة الشمسية إلى الأرض، تنبعث من بلازما ذات كثافة قدرها 10^{14} particles/m^3، والتردد المناظر لهذه الكثافة تقريبا 100MHz، وهو مايناظر الطول الموجي في حدود المترات. معظم تجارب التفريغ الكهربي في معامل البلازما تقدر قيمة كثافة البلازما 10^{18} particles/m^3، والتردد المناظر لهذه الكثافة تقريبًا 10000MHz، وهو مايناظر الطول الموجي في حدود السنتيمترات. أما مفاعلات الاندماج النووي الحراري، فإن قيمة كثافة البلازما تكون في حدود

10^{22} particles/m^3 ويكون التردد في حدود 10^{12} Hz، وهو ماينـــاظر الطـــول الموجي في حدود المليمترات.

هناك كميات أخرى، يمكن التعبير عنها بدلالة تردد البلازما. ومن أهم هـــذه الكميات توصيلية البلازما σ، وتعطى بالعلاقة:

$$\sigma = \omega_{\circ}^{2} \varepsilon_{\circ} \tau \qquad (9)$$

عند وضع البلازما تحت نفوذ المجال المغناطيسي B، يصبح نموذج المـــائع معقدًا تماما. يخضع التيار الذي يسري بمحاذاة المجال B لقانون أوم بالقيمـــة المعتادة للتوصيلية، وهذه القيمة تسمى التوصيلية الطوليـــة $\sigma_{//}$. نفـــرض أن الإلكترونات تتحرك تحت تأثير نفوذ مجال كهربي E خارجي، ويتسبب هذا المجال في وجود تيار مستعرض (Hall current)؛ مما يجعل توصيلية البلازما متابينة الخواص (anisotropic). ومن أهم خواص هذه التوصيلية:

١- تتناسب التوصيلية العمودية على المجال B عكسيا مع مربـــع المجـــال $(\sigma_{\perp} \propto 1/B^{2})$.

٢- التيار لايمر فقط موازيا للمجال E، بل يمر عموديا عليه (Hall effect).

البلازما التي تؤدي الكتروناتها عديدًا من التـــدويم الـــسيكلتروني (cycltron gyration) بين التصادمات، تعرف باسم البلازما الممغنطة (magnetoplasma). التوصيلية المتباينة الخواص في البلازما الممغنطة تكون التوصيلية الطوليـــة، أكبر بكثير من التوصيلية العمودية، وبالتالي يكون التيـــار العمـــودي علـــى المجال الكهربي أكبر من التيار الموازي للمجال E.

الجسيمات السريعة لها فرصة تصادم مع الجسيمات الأخرى، تكـــون أقـــل، وسرعة الجسيمات تكون في زيادة مستمرة، عند تحركها على طول خطـــوط المجال المغناطيسي. وفي وجود التصادمات المتكررة، تقل سرعة الجسيمات كذلك بتحركها عموديًا على خطوط المجال المغناطيسي بإكراه الجسيمات على التدويم في مدارات سيكلوترونية، وتزداد بالتالي تـــزداد فـــرص التعـــرض للتصادم. في البلازما تامة التأين (fully ionized) التوصـــيلية الطوليـــة ضـــعف التوصيلية العمودية. في البلازما المتأينة جزئيًـــا (partially ionized)، والتـــي تحتوي على جسيمات متعادلة، تكون متابينة الخواص بهـــا قليلـــة. وخلاصـــة القول، أن البلازما عديمة التصادم تسلك سلوك المائع المتصادم، ولاتنطبـــق

بالطبع نظرية المائع على الجسيمات، التي تتحرك على طول خطوط المجال المغناطيسي، ولكن تنطبق النظرية على الجسيمات، التي تتحرك عموديًّا على المجال.

معادلة الحركة للمائع

في حالة البلازما تامة التأين، التي تحتوي على نوعين من الجسيمات (الأيونات والإلكترونات)، وتتفاعل مع بعضها في غياب التصادمات بسبب المجالات الكهربية والمغناطيسية الناشئة عن تلك الجسيمات. ويمكن الحصول على معادلة الحركة للمائع من معادلة الحركة للجسيم الفردي:

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = e(E + \vec{v} \times \vec{B}) \qquad (10)$$

وبفرض عدم وجود تصادمات وحركات حرارية، عندئذ تتحرك كل الجسيمات مع بعضها في عنصر واحد، هو عنصر المائع، ومتوسط السرعة $\vec{u}$ للجسيمات هي نفس سرعة الجسيم على حدة $\vec{v}$، وبضرب المعادلة (10) في الكثافة n والتعويض عن $\vec{v}$ بدلالة $\vec{u}$، نحصل على العلاقة:

$$mn\frac{d\vec{u}}{dt} = ne(E + \vec{u} \times \vec{B}) \qquad (11)$$

وباستخدام العلاقة الرياضية:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}.\vec{\nabla})\vec{u} \qquad (12)$$

نحصل على:

$$mn\left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}.\nabla)\vec{u}\right] = ne(E + \vec{u} \times \vec{B}) \qquad (13)$$

وتعرف المعادلة (13) بمعادلة الحركة للمائع، في وجود القوى المغناطيسية فقط. أما في وجود قوى ميل الضغط $-\nabla p$، فإنه يضاف إلى الطرف الأيمن للمعادلة (13)، وتصبح:

$$mn\left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}.\nabla)\vec{u}\right] = ne(E + \vec{u} \times \vec{B}) - \nabla p \qquad (14)$$

في حالة البلازما المتأينة جزئيا، والتي تحتوي على جسيمات متعادلة، فإنها تتصادم مع الجسيمات المشحونة (الأيونات والألكترونات)، وبالتالي يحدث تبادل لكميات الحركة وكمية الحركة المفقودة، خلال التصادمات، تتناسب مع السرعة النسبية $(u-u_{\circ})$؛ حيث $u_{\circ}$ سرعة الجسيمات المتعادلة، وبفرض أن τ التوسط الزمني الحر بين التصادمات ثابتة. وعندئذ، يكون مقدار القوة الناتجة:

$$mn(u-u_{\circ})/\tau$$

وبالتالي نحصل على معادلة الحركة:

$$mn\left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}+(\vec{u}.\nabla)\vec{u}\right]=ne(E+\vec{u}\times\vec{B})-\nabla p-mn(u-u_{\circ})/\tau \qquad (15)$$

الهيدروديناميكا المغناطيسية (MHD)

علم الهيدروديناميكا المغناطيسية، فرع من فروع المعرفة الأكاديمية، التي تهتم بدراسة حركة الموائع الموصلة، في وجود المجال المغناطيسي، وأول من اهتم بدراسة MHD العالم هانز ألفين Alfven، وحصوله على جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٧٠م. وفكرة الهيدروديناميكا المغناطيسية تقوم على أن المجالات المغناطيسية تستحث تيارات في حركة الموائع الموصلة (البلازما). والعادلات التي تصف الهيدروديناميكا المغناطيسية، هي مجموعة مؤلفة من معادلات نڤير – ستوك (Navier - Stokes) لديناميكا الموائع، ومعادلات ماكسويل للكهرومغناطيسية. وهذه المعادلات التفاضيلية يمكن حلها في آن واحد سواء تحليليًّا أو عدديًّا.

تهتم الهيدروديناميكا المغناطيسية بدراسة سلوك الموائع والغازات الموصلة كهربائيًّا، مثل: المعادن المنصهرة والغازات المتأينة، عندما تجري في منطقة تخضع إلى مجالات كهربائية ومغنطيسية. وبما أنه يشمل موائع وغازات، فهو يسمى أحياناً، ميكانيكا الموائع المغنطيسية، ويسمى أحياناً أخرى علم الموائع المغنطيسية. وتتناول تطبيقات هذا العلم فروعاً كثيرة؛ ففي الفلك يساعد هذا العلم على فهم ما يحدث داخل الشمس من نشاطات، تؤدي إلى ظهور البقع الشمسية الدوريةً، وكذلك ما يحدث داخل النجوم الأخرى خلال دورة حياتها. وفي الجيولوجيا، يُسلط الضوء على المحرك الأرضي في اللب، وما ينجم عنه من خواص مغنطيسية وميكانيكية، ويبحث هذا العلم أيضاً في

توليد الطاقة الكهربائية مباشرة من الغازات الحارة، المندفعة المتأينة في المولّدات generators، التي تعتمد هذه الحركية المغنطيسية. كما يبحث هذا العلم في تتبع ما يحدث في الاندماج النووي، عند تسليط طاقة كهرمغنطيسية عالية جدًّا على حبابة من الديتريوم والتريتيوم في المختبر؛ لتقليد ما يحدث داخل الشمس، وفي المفاعلات النووية التي تستعمل معدن الصوديوم المصهور مبرداً فيه. وقد يكون أبرز تطبيقاته في دراسة البلازما عند محاولة حصرها في منطقة بعيدة عن جدران الحاوية، بوساطة المجالات المغناطيسية؛ ليتسنى رفع درجة حرارتها وضغطها إلى قيم، تقارب القيم المقابلة لها داخل النجوم.

والأهمية العملية للهيدروديناميكا المغناطيسية حاليا، تكمن فى أنها تلعب دورًا رئيسيًّا في الجهود القائمة؛ من أجل توليف والتحكم في الطاقة الهيدروجينية بغرض إنتاج الطاقة الكهربائية في المستقبل. وهذه الطريقة تُغني عن استخدام المفاعلات النووية لإنتاج الطاقة.

الهيدروديناميكا المغناطيسية هي نظرية العيانية السائل من البلازما. المعادلات التي تتحكم في المعادلات MHD، وماكسويل، ولحظات من المعادلة فلاسوف. وهذه لحظات تسفر عن المعادلات منفصلة عن الأيونات والإلكترونات، والتي تقترن عبر الحقول، ولدت من خلال الاصطدامات. ومن الشائع استخدام السائل لمجموعة واحدة من المعادلات، التي يمكن استخلاصها من خلال تجاهل الجمود الإلكتروني، على افتراض أن حركة الإلكترون بسرعة بالمقارنة مع مقاييس المصالح. وهذا يعادل الحد من مصلحتنا مرات مقارنة طويلة لتردد الإلكترون سيكلوترون وتردد البلازما. وبهدف تبسيط الاقتضاء، في كثير من الحالات، فإنه يتم بذل مزيد من تجاهل آثار مقاوم، وهذا بافتراض أن البلازما هو موصل الكمال. المعادلات MHD

Continuity $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho v) = 0$$

Momentum Balance $$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = J \times B - \nabla p$$

Equation of state $$\frac{dp}{dt} = -\gamma \ p\nabla.v$$

Amper law $$\mu_0 J = \nabla \times B$$

Faraday law $$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times E$$

Ohm law $$E + v \times B = \eta J$$

$$\nabla . B = 0$$

مولدات الهيدروديناميكا المغناطيسية

تشبه مولدات MHD المولدات الكهربائية التقليدية. والفرق الوحيد هو أنها تستخدم مائع موصل كهربائيًا، بدلاً من الموصلات الصلبة لتوليد الطاقة الكهربائية. أساسًا، فإن ديناميكا الموائع المغنطيسية هي منطقة بحثية، تشتمل على دراسة حركة الموائع الموصلة كهربائيًا، مثل: البلازما والمياه المالحة.

مولد MHD بسيط، يتكون من فوهة الغاز هي عبارة عن غرفة احتراق، التي يضخ فيها نبضة من الغاز في قناة / مجرى. تعمل جدران القناة باعتبارها قطبًا، ويتم تغذية التيار الكهربائي المستحث لتغذية الأحمال من قبل الدوائر الخارجية التي تزود الكهرباء المولدة إلى الوجهة المطلوبة. ويمكن بناء مولدات MHD بتصميمات مختلفة، مثل: مولد فاراداي، ومولد قاعة القرص. وكان فاراداي أول من صمم مولد MHD. وقدم من قبل مايكل فاراداي في عام ١٨٣١؛ حيث استخدام أقراص نحاسية ومغناطيس، على شكل حدوة حصان لتوليد الكهرباء.

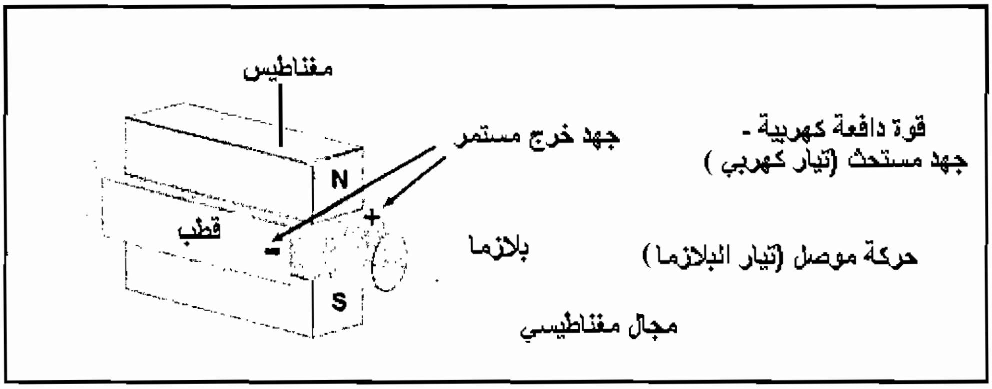
تحت ظروف الضغط العالي، يتم إنتاج الغاز الموصل كهربائيًا، من خلال حرق الوقود الأحفوري. تستخدم معظم نظم MHD الغاز الطبيعي والفحم أو الوقود الأحفوري. ومن ناحية أخرى، تستخدم الغازات الخاملة، مثل: الأرجون والهيليوم في بعض نظم MHD. يتم تمرير الغاز من خلال الفوهة بسرعة فائقة، تتراوح من ١٠٠٠ إلى ٢٠٠٠ متر في الثانية الواحدة. ولا تخلق مولدات MHD شحنة كهربائية، بل إنها كامنة في الموائع أو الغازات المؤينة. ويمكن زيادة التوصيلية للمائع، من خلال الاعتماد على أساليب مختلفة؛ فمثلاً إذا كان المائع هو غاز خامل؛ فمن الممكن إضافة كميات مناسبة من كربونات البوتاسيوم.

الغاز يدخل القناة أو المجرى؛ حيث يتم تطبيق مجال مغناطيسي قوي؛ بمساعدة مغناطيس فائق التوصيل. تصل كثافة القوة المغناطيسية أو المجال المغناطيسي داخل القناة إلى ما بين ٣–٥ تسلا. كلما مر الغاز عبر القناة، فإنه

يعاني قوة دافعة كهربية. كيف تنشأ هذه القوة؟ وفقًا لقانون فاراداي في تيار/جهد الحث الكهرومغناطيسي (القوة الدافعة الكهربية)، فإنها هي التي تستحث في سلك / ملف متى يكون هناك تغيير في وصلية الفيض المغناطيسي مع الملف. هنا، المغناطيسيات الكهربية ثابتة، ويتحرك المائع الموصل باستمرار.. وهذا يتسبب في توليد مجال كهربي.

كما ذكر، في وقت سابق، تتكون نظم MHD من قناة / مجرى، التي هي بمثابة جسر إلى الدائرة الخارجية، والتي ستسمح في نهاية المطاف بتدفق الكهرباء إلى الأحمال. السؤال الذي يطرح نفسه هنا: ما القطب؟ الأقطاب الكهربائية هي لوحات، وقضبان أو أسلاك، والتي تكون بمثابة موصل لتدفق الكهرباء، كما أنها بمثابة موصل إلى الدائرة الخارجية. هنا القناة بمثابة القطب. الدائرة الخارجية، موصلة بالقطب لإمدادات الطاقة الكهربائية، التي يتم نقلها إلى المسار المطلوب.

مولد الهيدروديناميكا المغناطيسية أو دينامو يحول الطاقة الحرارية أو الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية مباشرة. مولدات الهيدروديناميكا المغناطيسية مختلفة عن المولدات الكهربائية التقليدية؛ من حيث إنها يمكن أن تعمل في درجات حرارة عالية دون أجزاء متحركة. وقد تطورت مولدات الهيدروديناميكا المغناطيسية؛ لأن العادم من البلازما هو عبارة عن لهب، له القدرة على تسخين مراجل البخار لمحطة توليد الكهرباء. ولأن درجات الحرارة العالية لدى MHD تطورت؛ لتحتل المرتبة الاولى في زيادة كفاءة توليد الكهرباء، وخصوصًا عند حرق الفحم أو الغاز الطبيعي.



شكل (٤)

المفهوم الأساسي الذي يقوم عليه الدينامو الميكانيكي والمائعي سواء. ويستخدم دينامو المائع، مع ذلك، حركة المائع أو البلازما لتوليد التيارات، التي تولد الطاقة الكهربائية. ويستخدم الدينامو الميكانيكي، في المقابل، حركة الأجهزة الميكانيكية لإنجاز هذا. الفرق الفني بين مولد MHD ودينامو MHD، هو ملاحقة مسار الجسيمات المشحونة.

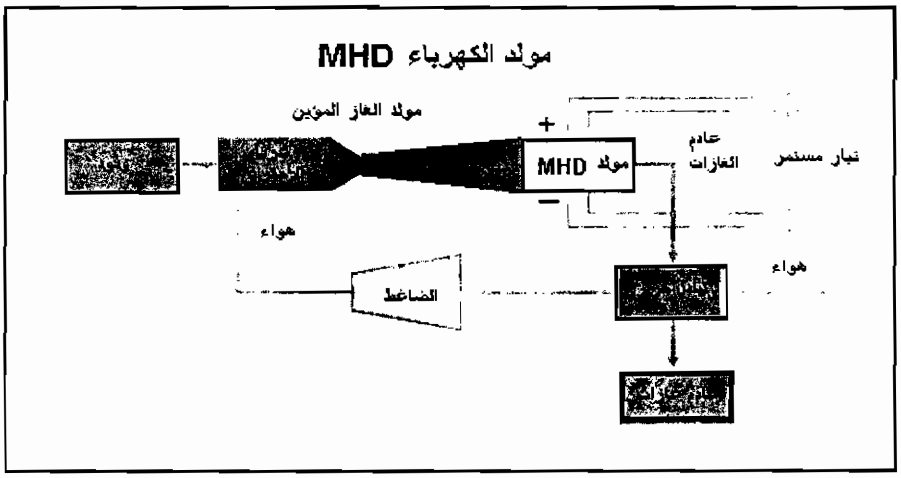
يحتاج نظام مولد MHD إلى درجة حرارة عالية لمصدر الغاز، الذي يمكن أن يكون مادة تبريد من مفاعل نووي أو أكثر. ومن المرجح أن يكون الارتفاع في درجة حرارة الغازات المحترقة ناتجة عن احتراق الوقود الأحفوري، بما في ذلك الفحم، في غرفة الاحتراق. الرسم البياني أدناه يبين مكونات النظام المحتملة.

يقلل توسيع الفوهة من ضغط الغاز، وتزداد بالتالي سرعة البلازما (قانون برنولي)، من خلال مجرى مولد لزيادة انتاج الطاقة. ولسوء الحظ في الوقت نفسه، فإن انخفاض الضغط يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة البلازما (قانون جاي لوساك)، الذي يزيد أيضًا من مقاومة البلازما؛ ولذلك لا بد من إيجاد حل وسط بين برنولي وجاي لوساك. يتم استخدام حرارة العادم من مائع التشغيل في تدوير الضاغط؛ لزيادة معدل احتراق الوقود، ولكن سيتم إهدار كثير من الحرارة، مالم يتم استغلالها في عملية أخرى.

الشرط الرئيسي للنظام هو تخليق وإدارة غاز البلازما الموصل؛ لأن النظام يعتمد على وجود البلازما عالية التوصيل الكهربائي. موائع التشغيل المناسبة، هي: الغازات المشتقة من الاحتراق، والغازات النبيلة، والأبخرة المعدنية القلوية.

غاز البلازما

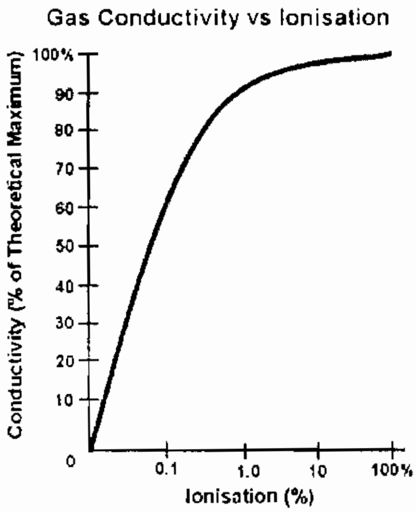
لتحقيق التوصيلية العالية، لا بد من تأين الغاز، وفصل الإلكترونات من الذرات أو الجزيئات تاركًا أيونات الشحنة الموجبة للغاز. تتدفق البلازما عبر المجال المغناطيسي بسرعة كبيرة. وفي بعض التصميمات، تفوق سرعتها سرعة الصوت، وتدفق الجسيمات المشحونة يوفر ما يلزم من الموصلات الكهربائية المتحركة.



شكل (٥)

أساليب تأين الغاز

هناك أساليب ملائمة ومختلفة لتأين الغاز، وجميعها تعتمد على نقل الطاقة الكافية للغاز. ويمكن تحقيق ذلك عن طريق التسخين، أو إشعاع الغاز بالأشعة السينية، أو أشعة جاما. كما يقترح استخدام غازات التبريد، مثل: الهليوم، وغاز ثاني أكسيد الكربون المستخدمة في بعض المفاعلات النووية كوقود البلازما؛ لتوليد الكهرباء مباشرة من مولد MHD، بدلاً من استخراج الطاقة الحرارية من الغاز، عن طريق مبادلات حرارية لينشئ البخار، الذي يقود مولدات التوربينات. غالبًا ما يتم إضافة بذور المواد، مثل: كربونات البوتاسيوم، أو السيزيوم بكميات صغيرة، وعادة حوالي ١٪ من إجمالي التدفق الجماعي لزيادة تأين وتحسين التوصيلية؛ لا سيما من احتراق غاز البلازما.



شكل (٦)

بما أن درجة حرارة البلازما تصل إلى 1000 درجة مئوية، فـإن المجـرى الحاوي للبلازما يجب أن يشيد من مواد، لها القدرة على مقاومة درجة الحرارة العالية، ويجب أن تكون الأقطاب موصلة بالإضافة إلى مقاومتها للحرارة.

المولدات الهيدروديناميكا المغناطيسية هـي، الآن، عمليـة لأنـواع الوقـود الأحفوري، ولكن قد تجاوزتها تكنولوجيات أخرى أقل تكلفـة، مثـل: دورات مجتمعة في توربينات الغاز، أو المنصهرة في خلايا الوقود كربونات العادم، مع ارتفاع درجات الحرارة البخار لتوربينات البخار. قيمة فريدة من MHD هـو أنه يسمح بترقية أقدم قوة الوقود الأحفوري دورة واحدة مصنع لكفاءة عالية.

الدينامو الهيدروديناميكا المغناطيسية الطبيعي، موضع اهتمام للبحث في فيزياء البلازما، وذو أهمية كبيرة لمجتمعات الفيزياء الأرضية، والفيزيـاء الفلكيـة. ومن وجهة نظرهم أن الأرض دينامو MHD كروي، وأنه بمساعدة الجسيمات (البروتونات والألكترونات) المكونة للرياح الشمسية ينتج الـشفق القطبـي. واختلاف الطبقات الكهرومغناطيسية المشحونة الناتجة بواسطة تأثير الدينامو على المجال الجيومغناطيسي للأرضي، يؤدي إلى ظهـور الـشفق القطبـي. وباستخراج القدرة من بلازما الرياح الشمسية، تتباطأ الجسيمات، ويتم سحبها على طول خطوط المجال، في عرض متألق فوق القطبين.

مبدأ

يصف قانون القوة للورنتز Lorentz تأثير الجسيمات المشحونة، التي تتحرك في مجال مغناطيسي ثابت، وأبسط صورة لهذا القانون تعطى بمعادلة المتجه:

$$\mathbf{F} = Q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

حيث F هي القوة المؤثرة على الجسيم، Q هى شـحنة الجـسيم، وV، هـو السرعة للجسيم، و B هو المجال المغناطيسي. والمتجه F عمودي على كـلا من B وV طبقًا لقاعدة اليد اليمنى.

الشيء المهم هو أن نتذكر أن اتجاه القوة هو متجه عمودي علـى مـستوى السرعة والمجال المغناطيسي. ومع ذلك، فإنه يتطلب تحليلاً متعمقًا في دراسة معادلة نافيير ستوكس (المدرجة في ديناميكية الموائع)، وقـانون ماكـسويل للكهرومغناطيسية. ومعادلات نافيير ستوكس والمعادلات التفاضلية، هي التي تحدد سرعة السائل، في أي لحظة معينة من الزمن.

الفصل الرابع
الموجات الكهرومغناطيسية فى البلازما

انتشار الموجات الكهرومغناطيسية فى العوازل

ويتجلى بسهولة أن المجالات المصاحبة لانتشار الموجات الكهرومغناطيسية، خلال وسط عازل منتظم له ثابت العزل الكهربائي ϵ لتحقيق المعادلات:

$$\left(\frac{\epsilon}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2\right)\boldsymbol{E} = 0, \qquad (4.1)$$

و

$$\nabla \wedge \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}. \qquad (4.2)$$

الحلول للموجة المستوية لتلك المعادلات معروفة جيدًا:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0\, e^{i(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}-\omega t)}, \qquad (4.3a)$$

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{B}_0\, e^{i(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}-\omega t)}, \qquad (4.3b)$$

حيث E_o و B_o ثوابت المتجهات.

$$\frac{\omega^2}{k^2} = \frac{c^2}{\epsilon}, \qquad (4.4)$$

و

$$\boldsymbol{B}_0 = \frac{\boldsymbol{k}\wedge\boldsymbol{E}_0}{\omega}. \qquad (4.5)$$

تعطى السرعة الطورية للموجة بالعلاقة:

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n}, \qquad (4.6)$$

حيث

$$n = \sqrt{\epsilon} \qquad (4.7)$$

يسمى معامل الانكسار للوسط.

ومن الواضح أن الموجات الكهرومغناطيسية تنتشر بسرعة طورية أقل من سرعة الضوء، في وسط العازل الملائم. في بعض الأوساط العازلة، تكون ϵ مركبة، وهذا يؤدي الى المعادلة (4. 4)، متجه الموجة k كمية مركبة. للموجة التي تنشر في الاتجاه x نحصل المعادلة:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 \exp[\mathrm{i}\,(\mathrm{Re}(k)\,x - \omega t)]\exp[-\mathrm{Im}(k)\,x]. \qquad (4.8)$$

وبالتالي، يؤدي ثابت العزل المركب إلى توهين (أو تكبير) للموجة، التي تنتشر خلال والوسط.

عمليًا في الأوساط العازلة تكون ε عموما مركبة ومتغيرة مع تردد الموجة ω، وبالتالي الأمواج ذات الترددات المختلفة، تنتشر خلال الوسط العازل بسرعات طورية مختلفة، وتعرف هذه الظاهرة باسم التشتت. علاوة على ذلك، يوجد نطاق من ترددات هذه الأمواج، يحدث له توهين (امتصاص). وكل هذا يسبب مشكلة في تحديد سلوك حزم الموجات، كلما انتشرت عبر الوسط العازل بعيدًا عن الاستقامة. يذكر، أن الحل لهذه المشكلة لحزم الموجات السفر، من خلال فراغات تافهة إلى حد ما. تنتشر الحزمة الأمواج بسرعة دون تغيير شكلها.

تم الحصول علي أغلبية المعلومات التي تصل لدينا بخصوص الكون من دراسة الموجات الكهرومغناطيسية، المنبعثة من الأشياء البعيدة. تنتشر حزم الأمواج في الفراغ بسرعة الضوء دون تغير، ولكن هذه الموجات عندما تنشر عبر الوسط العازل (وسط متشتت) على سبيل المثال، وسط ما بين النجوم، والأيونوسفير، والغلاف الجوي، يتغير شكلها قبل أن تصل لدينا. ولذلك، من المهم أن نفهم الحقائق، التي تحدد جوانب هذه الإشارات الموجية من مصادرها، والتي تعدل بشدة من خلال الأوساط المشتتة، التي تنتشر بها هذه الأمواج لكي تصل إلينا.

شكل ثابت العزل الكهربائي

دعنا نحقق في دراسة انتشار الموجات الكهرومغناطيسية خلال وسط شفاف، متماثل الخواص وغير موصل.

تعطى الإزاحة الكهربية داخل الوسط بالعلاقة:

$$\boldsymbol{D} = \epsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}, \tag{4.9}$$

حيث P هي الاستقطاب الكهربائي. ونظرًا لفرق الكتلة بين الإلكترونات والأيونات، تزاح الإلكترونات أكثر تحت نفوذ المجال الكهربي، وبالتالي يكون التقريب الأول، هو أن الاستقطاب P يحدد باستجابة الإلكترون للموجة. نفترض أن الإلكترونات تزاح مسافة s عن موضع سكونه في وجود الموجة، ويترتب على ذلك:

$$\boldsymbol{P} = -N e\, \boldsymbol{s}, \tag{4.10}$$

حيث N هي كثافة الإلكترونات.

دعنا نفترض أن هذه الإلكترونات مقيدة (شبه مرنة) بمواضع سكونها؛ بحيث إنها تسعى للرجوع إلى مواضعها عند إزاحتها عن بعضها بالمجال الكهربي E، ويتبع ذلك أن الإزاحة تحقق المعادلة التفاضلية في الصورة:

$$m\, \ddot{\boldsymbol{s}} + f\, \boldsymbol{s} = -e\boldsymbol{E}, \tag{4.11}$$

حيث m كتلة الإلكترون، fs- قوة الأسترجاع، والنقطة ترمز للاشتقاق الجزئي بالنسبة للزمن. أيضًا المعادلة السابقة تكتب:

$$\ddot{\boldsymbol{s}} + g\, \omega_0\, \dot{\boldsymbol{s}} + {\omega_0}^2 \boldsymbol{s} = -\frac{e}{m}\, \boldsymbol{E}, \tag{4.12}$$

حيث

$${\omega_0}^2 = \frac{f}{m} \tag{4.13}$$

هو تردد التذبذب المميز للإلكترونات.

في الغالب، لدى كل الأوساط العازلة، فإن هذا التردد يكمن في المنطقة فوق البنفسجية البعيدة من الطيف الكهرومغناطيسي.

في المعادلة (٤ . ١٢) نجد إضافة حد الاضمحلال الظـــاهراتي $g\,\omega_0\,\dot{\boldsymbol{s}}$، ؛ لكي يأخذ في الحسبان حقيقة إثارة الإلكترون بالمجال الكهربي الدفعي. عمومًا، يمكن اعتبار الإلكترونات كمذبذبات.

دعنا نفترض أن هذه الإلكترونات تتذبذب متجانسة مع الموجة، عنـــد تـــردد الموجة. ω وتتبع المعادلة. (٤ . ١٢) العلاقة الآتية:

$$\boldsymbol{s} = -\frac{(e/m)\,\boldsymbol{E}}{{\omega_0}^2 - \omega^2 - \mathrm{i}\,g\,\omega\,\omega_0}. \tag{4.14}$$

نلاحظ إهمال استجابة الإلكترونات لمركبة المجال المغناطيسي للموجة، ومن السهل أن نبرهن أن هذا التقارب الجيد لتحقيق هذه الإلكترونات لايتذبذب مع السرعات النسبية، وبالتالي تحقق المعادلة (٤ . ١٠) العلاقة:

$$\boldsymbol{P} = \frac{(N e^2/m)\,\boldsymbol{E}}{{\omega_0}^2 - \omega^2 - \mathrm{i}\,g\,\omega\,\omega_0}. \tag{4.15}$$

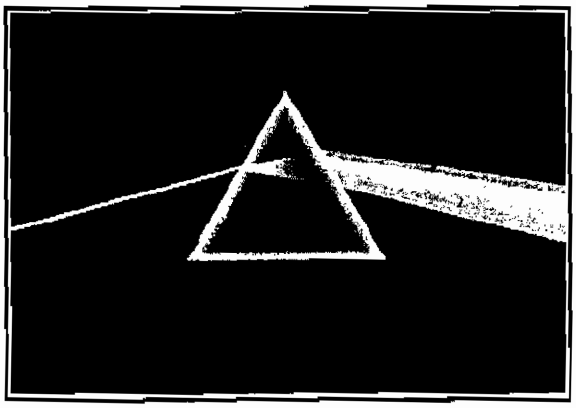
بتعريف الإزاحة الكهربية D:

$$\boldsymbol{D} = \epsilon_0\epsilon\,\boldsymbol{E} = \epsilon_0\boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}, \tag{4.16}$$

تتبع المعادلة:

$$\epsilon(\omega) \equiv n^2(\omega) = 1 + \frac{(N e^2/\epsilon_0 m)}{{\omega_0}^2 - \omega^2 - \mathrm{i}\,g\,\omega\,\omega_0}. \tag{4.17}$$

وهكذا، يعتمد معامل الانكسار على التردد. وبما أن ω_0 تقع فـــي المنطقـــة فوق البنفسجية البعيدة من الطيف الكهرومغناطيـــسي ($g \ll 1$)، يتـــضح المقام ${\omega_0}^2 - \omega^2 - \mathrm{i}\,g\,\omega\,\omega_0 \simeq {\omega_0}^2 - \omega^2$، والذى يكون موجبًـــا فـــي الطيف المرئي ويكون أكبر في المنطقة الحمراء عن المنطقة الزرقاء. وهـــذا يفسر زيادة انكسار الضوء الأزرق عن الأحمر؛ أي يزداد معامل الانكـــسار بزيادة التردد، ويقل بزيادة الطول الموجي، وهو ما يعرف بالتشتت العـــادي. ومثال ذلك تحليل الضوء الأبيض، خلال منشور زجاجي كما بالشكل (١).



الشكل (١): تحليل الضوء الأبيض خلال منشور زجاجي.

دعنا نفترض وجود عدد N من الجزيئات لكل وحدة حجم بعدد Z من الإلكترونات لكل جزيء، وعوضًا عن تردد الذبذبة الأحادية لكل إلكترون يوجد f_i من الإلكترونات لكل جزيء بتردد ذبذبة ω_i وثابت اضمحلال g_i. من السهل أن نبرهن العلاقة:

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \sum_i \frac{f_i}{{\omega_i}^2 - \omega^2 - \mathrm{i}\, g_i\, \omega\, \omega_i}, \qquad (4.18)$$

حيث قوى المذبذبات f_i تحقق العلاقة:

$$\sum_i f_i = Z. \qquad (4.19)$$

معالجة ميكانيكا الكم أكثر دقة في مايتعلق باستجابة الذرة أو الجزيء لموجة كهرومغناطيسية، ذات سعة صغيرة التي تؤدي إلى علاقة التشتت لصورة المعادلة (٤,١٨) عدا تلك الكميات f_i ،ω_i ،g_i. بما أن ثوابت الاضمحلال g_i صغيرة، بالمقارنة بالوحدة ($g \ll 1$)، فإنها تتبع المعادلة (4.18) $n(\omega)$ كمية حقيقية لمعظم ترددات الموجة. يكون العامل $({\omega_i}^2 - \omega^2)^{-1}$ موجبًا في حالة $\omega < \omega_i$، وسالبًا في حالة $\omega > \omega_i$. وهكذا عند الترددات المنخفضة أقل من ω_i كل الأطراف لحاصل الجمع في المعادلة (4.18)، تكون موجبة، وتصبح الكمية $n(\omega)$ أكبر من الوحدة. عندما تزداد ω تمر بقيم متتابعة ω_i، وبالتالي تزداد الأطراف السالبة في حاصل المجموع؛ حتى يصل في أخر الأمر المجموع الكلي سالبًا،

وتصبح الكمية $n(\omega)$ أقل من الوحدة. وهكذا عند الترددات العالية للموجات الكهرومغناطيسية، والتي تنتشر خلال الأوساط العازلة بسرعات طورية، تتعدى سرعة الضوء في الفراغ C.

تظهر الأمواج في الطبيعة إما بصورة أمواج صوتية، في وسط مثل الهواء، أو تكون أمواج ضوئية. كذلك، يمكن تعريف سرعة الموجة مثل الأمواج الصوتية في الهواء، أو الأمواج الضوئية في الفراغ، والتي تملك خصائص اضطرابية بزيادات مختلفة التردد. تكون الأمواج الضوئية مستعرضة لاتجاه انتشار الضوء، بينما تكون الأمواج الصوتية طولية (تضاغط وتحلخل).

يمكن أن تثار أنواع مختلفة من التذبذبات والأمواج في البلازما؛ أي إن البلازما تملك عددًا كبيرًا من درجات الحرية التذبذبية. العمليات التذبذبية التي تبدأ من مكان ما، وتنتشر في الفراغ من تلك النقطة. ويسمى انتشار الذبذبة من هذا النوع موجة، تتميز العمليات التذبذبية بثلاث كميات همى: السعة – التردد والطور. السعة والتردد كميات مطلقة، وهما يميزان العملية التذبذبية المعطاة أما الطور فهو كمية نسبية. تكون العمليات التذبذبية في البلازما مصاحبة لعدد من الكميات المتغيرة، في آنٍ واحد، والتي تعتمد على الأخرى، البعض منها ابتدائي والأخر ثانوي. إذا تذبذب المجال الكهربي والمغناطيسي في البلازما، عندئذ يثار تيار دوري، يتفاعل مع المجال المغناطيسي، ويعطي قوة لورنتز (قوة دافعة كهربية) تؤدي إلى تحريك البلازما، وبناء على ذلك، فإن أي عملية تذبذبية في البلازما، تكون مصحوبة بسرعة متغيرة دوريًا في البلازما، والتي تؤدي بدورها إلى تذبذبات ضغط. ويمكن القول بأن تذبذبات البلازما هي ذبذبات كهرومغناطيسية، وحركة مائع في آنٍ واحد، عدا حالات خاصة معينة. وعمومًا، يمكن القول بأن الذبذبات في البلازما تكون كهروستاتيكية، كهرومغناطيسية، حركة مائع، صوتية .. إلخ. تكون خصائص هذه الذبذبات خطية عند السعات الصغيرة وتوصف بمعادلات خطية. والخاصية الأساسية للذبذبات الخطية أن ترددها لايعتمد على السعة، أما الذبذبات غير الخطية تكون أكثر تعقيدًا.

تؤدي الاضطرابات في البلازما الى نشوء الذبذبات، والتى تنتشر بسرعات تسمى سرعة انتشار الموجة. في الحالات البسيطة، لاتعمد السرعة على التردد. وفي البلازما غالبا ما تعتمد سرعة انتشار الموجة على التردد، ويسمى "تشتتًا". في وجود التشتت، يجب أن نفرق بين السرعة الطورية وسرعة المجموعة.

في غياب الشتت نجد أن:

السرعة الطورية = سرعة المجموعة = مقدار ثابت

في الفراغ غير المحدود، تثير كل الاضطرابات أمواجًا عابرة، وطور هـذه الأمواج يتغير في الفراغ. في البلازما المحدودة، نجد أن الحـدود المتاخمـة للبلازما تحدث انعكاسات متعددة لتلك الأمواج؛ مما يؤدي إلى تأسيس أمـواج مستقرة، لها الطور نفسه في أي مكان. ومن ثم نحصل على علاقة رنين بين السرعة الطورية، وأبعاد الحجم الحاوي للبلازما. ويعرف هذا الحجـم باسـم الرنان، وتعرف ذبذبات الموجة المستقرة باسم الذبذبات المميزة للرنان. وأدنى الترددات المميزة يسمى التردد الأساسي، أما الذبذبات ذات الترددات العاليـة فتسمى توافقيات. ومابين الأمواج العابرة في الفراغ الحر والأمواج المستقرة في الرنان، هي أمواج تنتشر على طول القناة (الأنبوبـة)، مرتـدة بواسـطة الجدران. تتحرك هذه الأمواج على طول محور القناة، وتعمل كأمواج مستقرة في قطاع مستعرض وتعرف هذه القنوات باسم مرشدات الأمواج.

يحدث اضمحلال لذبذبات البلازما بسبب عمليات التبديد المختلفة، كما يحدث لحركة البندول؛ حيث تضمحل الذبذبات تدريجيًا بسبب الاحتكاك، وتتحول طاقة الذبذبات إلى حرارة. وأبسط آلية لتبديد الذبذبات في البلازما التـصادم بـين الجزيئات، التي تحول طاقة الذبذبات إلى حرارة، وهذا يعني حركة الجسيمات عشوائية. إذا مر تيار كهربي في البلازما، يتحول جزء من طاقة التيار إلـى حرارة بسبب المقاومة الكهربية (توصيلية البلازما محدودة). الحرارة المتولدة بالتيار تعرف باسم تسخين جول، وتبديد جول هـو حالـة خاصـة نتيجـة التصادمات بين الجزيئات، وبالتالي تنتج المقاومة الكهربية للبلازما.

إذا تحركت البلازما ككل، في هذه الحالة، تظهر التصادمات في صورة احتكاك داخلي، وهو ما يعرف بالتبدد اللزج. وفي البلازما ذات الكثافة العالية، تتغلب هذه الألية من التبدد اللزج. أما في البلازما الأقل كثافة الاضمحلال، لايعتمـد على التصادمات. وهذا التبدد العشوائي يصاحبه تحول في طاقة التذبذب، إلى أنواع أخرى من الذبذبات (أو حركة كتلة)، وليست إلى حرارة.

تذبذبات البلازما الكهروستاتيكية

في غياب المجال المغناطيسي، علاوة وجود الذبذبات الصوتية، يوجد نوع فقط من الذبذبة التي تميز البلازما، وهي ناتجة عن فصل الشحنة. عند إزاحة الشحنات الموجبة أو السالبة في البلازما شبه المتعادلة، تتولد ذبذبات تسمى ذبذبات كهروستاتيكية، أو لانغمير. وببساطة تعرف بذبذبات البلازما؛ لأنها النوع الأكثر شيوعا في الذبذبات. ويلاحظ هذا النوع من الذبذبات بصورة أكثر وضوحًا في وجود المجال المغناطيسي. عندما يكون اتجاه المجال الكهربي وحركة الجسيمات موازية للمجال المغناطيسي، عندئذ لايؤثر المجال المغناطيسي على حركة الجسيمات.

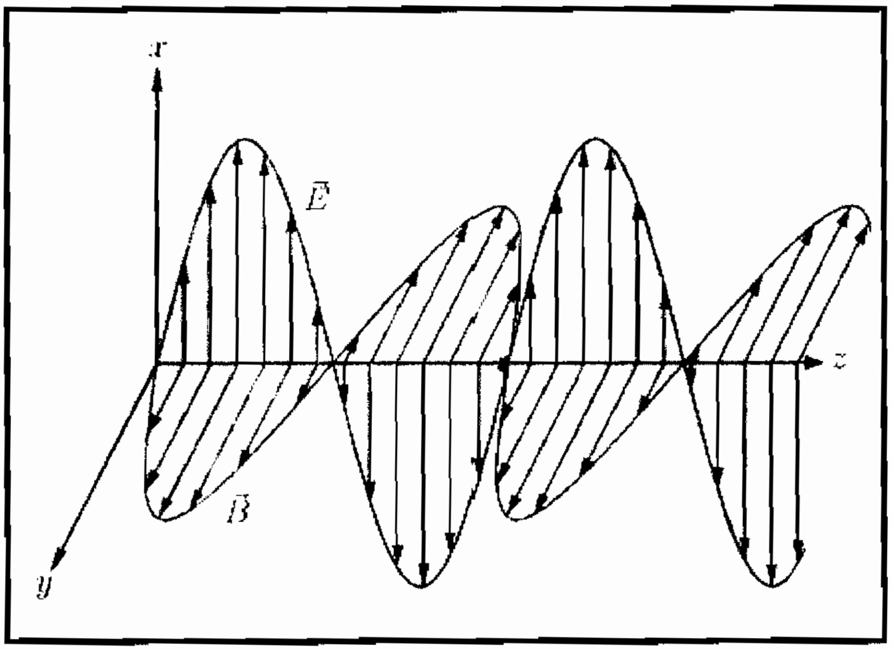
في الغاز العادي، تؤدي حركة الجسيمات الى اضطراب في الضغط تنتشر بسرعة الصوت. وفي البلازما تحدث هذه العملية فقط، إذا أزيحت الجسيمات (الأيونات والإلكترونات) في آنٍ واحد، وبالتالي لم يأخذ فصل الشحنة مكانه (عدم حدوث فصل شحنات). أما إذا أزيحت الشحنات السالبة (الإلكترونات) بالنسبة للأخرى الموجبة (الأيونات)، بالإضافة إلى اضطراب الضغط يوجد فراغ شحنة، الذي ينتج مجالاً كهربيًا. وتحت تأثير تألف قوة الضغط والمجال الكهربي، يوجد حركة موجية. في البلازما الباردة، يؤثر المجال الكهربي فقط، ويعتمد تردد الذبذبة فقط على كثافة البلازما، ويسمى هذا التردد المميز تردد البلازما.

إذا أخذنا الضغط الحراري، في الاعتبار، عندئذ يظهر التشتت، ويعطى تردد البلازما بالعلاقة:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + 3k^2 v_{th}^2 \qquad (4.20)$$

توضح المعادلة التردد كدالة في العدد الموجي k، وتسمى علاقة تشتت. وعند تطابق اتجاه انتشار موجة البلازما، مع اتجاه المجال الكهربي وحركة الجسم (كما في حالة الموجة الصوتية)، يقال إن هذه الذبذبات طولية عكس الموجات الكهرومغناطيسية المستعرضة؛ حيث يقع المجالان الكهربي والمغناطيسي في مستوى عمودي، على اتجاه الانتشار كما بالشكل (٢). في البلازما الكثيفة، تضمحل ذبذبات البلازما بسرعة جدًا بسبب التصادمات.

أبسط الطرق وأكثرها شيوعًا لإثارة ذبذبات البلازما، هو استخدام حزمة الإلكترونات. تعبر حزمة من الإلكترونات السريعة خلال البلازما، وتسبب إزاحة لإلكترونات البلازما، وتثير ذبذبات البلازما.



الشكل (٢): انتشار الموجات الكهرومغناطيسية المستعرضة.

البلازما هي مائع مركب، يدعم عديد من أنماط الأمواج في البلازما؛ بسبب شمول البلازما على الغاز والقوى الكهرومغناطيسية؛ حيثما تقاد حركة الجسيمات بأنواع موجية غير معرفة، بواسطة المجالات المغناطيسية والمجالات الفيزيائية الأخرى. وتشمل قوى الاسترجاع: الضغط الحركي والقوى الكهربائية والمغناطيسية. وظواهر الموجة هامة لتسخين البلازما، وعدم الاستقرار التشخيص في الفراغ وغيرها، وهناك نمط واحد فقط للموجة، هي الموجة الكهرومغناطيسية، وسرعاتها $\omega/k = c$، ولها مركبات B , E عمودية على كل متجه من الموجة k . في الهواء، وعلى حد سواء، تنتشر كل من الموجات الصوتية والموجات الكهرومغناطيسية. وفي البلازما، تنتشر كل من الموجات الكهروستاتيكية والموجات الكهرومغناطيسية. وفي الحالة السالفة الذكر، يكون اضطراب المجال الكهربي المصاحب للموجة موازيًا لاتجاه انتشار الموجة $\mathbf{E}//\mathbf{k}$ ؛ بحيث لا يوجد اضطراب للمجال المغناطيسي المصاحب للموجة:

$$\nabla \times E = \mathrm{i}k \times E = \mathrm{i}\omega B = 0$$

بينما في الهواء، تنتشر الموجات الصوتية من خلال الاصطدامات، وفي البلازما عالية التأين، تحدث هذه الاصطدامات عبر المجالات الكهربية

للموجة. وهناك مجموعة كبيرة ومتنوعة من أنماط موجات البلازما، نظرًا لسرعة الطورية للموجة، تعتمد على كل من تردد الموجة وزاوية أنتشارها بالنسبة لخلفية المجال المغناطيسي. الترددات المهمة المميزة، هي: تردد الكترونات البلازما، والتردد السيكلتروني للإلكترونات. والتردد السيكلتروني للأيونات على الترتيب، هي: ω_{ce} و ω_{ci} و ω_{pe}.

يمكن تمثيل كل اهتزازة دورية في المائع، اعتمادًا على تحليل فورييه، وكأنها مجموعة اهتزازات جيبية، لها ترددات وأطوال موجيه مختلفة. وتكون أي من هذه الاهتزازات موجة بسيطة. وعندما تكون سعة الاهتزازة صغيرة، يكون شكلاً جيبيًّا بشكل عام، وتكون لدينا مركبة واحدة فقط للموجة.

لنأخذ مثلا كمية جيبية، ولتكن الكثافة n، عندئذ نستطيع تمثيلها بالشكل:

$$n = n_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \qquad (4.21)$$

حيث نكتب وفق الإحداثيات الديكارتية:

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = k_x x + k_y y + k_z z$$

هنا ثابت يعمل سعة الموجة؛ المتجه الموجي.

وعندما تنتشر الموجة في الاتجاه x يكون لدينا فقط المركبة x، وتصبح المعادلة (4.21) بالشكل:

$$n = \bar{n} e^{i(kx - \omega t)} \qquad (4.22)$$

وإصلاحًا، يعتبر القسم الحقيقي من التابع الآسي كمية قابلة للقياس. ولنفرض أنه مقدار حقيقي، وسنرى لاحقا كيف أن هذا يعني أن القسم الحقيقي هو:

$$\mathrm{Re}(n) = \bar{n} \cos(kx - \omega t)$$

وتتحرك كل نقاط الموجة ذات الطور الثابت، بحيث تحقق أي:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{t} = v_\phi$$

نسمي المقدار السرعة الطورية.

لنأخذ الآن كمية جيبية أخرى، ولتكن المجال الكهربائي، وبما أننا اخترنا طور الكثافة n مساويًا للصفر، لنفرض الآن وجود طور آخر للمجـال الكهربـائي وليكن:

$$\mathbf{E} = \bar{\mathbf{E}}\cos(kx - \omega t + \delta) \text{ or } \mathbf{E} = \bar{\mathbf{E}}e^{i(kx-\omega t+\delta)}$$

حيث E مقدار حقيقي يمثل متجهًا ثابتًا.

وبما أن في الحالة العامة مقدار مركب، فإننا نستطيع كتابة:

$$\mathbf{E} = \bar{\mathbf{E}}e^{i\delta}e^{i(kx-\omega t)} \equiv \bar{\mathbf{E}}_c e^{i(kx-\omega t)} \qquad (4.23)$$

حيث $\bar{\mathbf{E}}_c$ سعة عقدية.

وبالتالي:

$$\tan\delta = \frac{\mathrm{Im}(\bar{\mathbf{E}}_c)}{\mathrm{Re}(\bar{\mathbf{E}}_c)} \qquad (4.24)$$

سوف نعتبر أن جميع السعات هي مقادير مركبة، وسنهمل كتابة الـدليل C: وبالتالي سنكتب كل المقادير المهتزة بالشكل:

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}\exp[i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - \omega t)] \qquad (4.25)$$

حيث يمكن أن تكون مقدارًا حقيقيًا أو مقدارًا عقديًا. ولا يمكن أن نخطئ في تمييز الحالات المختلفة؛ لأنه في حالة الأمواج الخطية، سوف يصبح التـابع الأسي exp في طرفي العلاقة. كما يمكن اختصاره من الطرفين.

سرعة المجموعة

غالبًا ما تفوق السرعة الطورية لأمواج البلازما سرعة الضوء C، وهذا ليس اختراقًا للنظرية النسبية، كما أنه لا يكمن لقطار أمواج لا نهائي ذي سعة ثابتة حمل المعلومات؛ فمثلا لا يمكن لحامل أمواج الراديو من حملها ما لـم يكـن معدلاً. ولاتنتشر الأمواج المعدلة بسرعة طوريـة، وإنمـا تنتـشر بـسرعة مجموعية، والتي تكون عادة اقل من سرعة الضوء c. ولتوضيح ذلك، يمكننا دراسة أمواج معدلة بإضافة الضربات الناتجة عن موجتين، لهما تقريبا التواتر نفسه، ولنفرض أن هاتين الموجتين من الشكل:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} < c$$

$$\begin{aligned} E_1 &= E_0 \cos[(k+\Delta k)x - (\omega+\Delta\omega)t] \\ E_2 &= E_0 \cos[(k-\Delta k)x - (\omega-\Delta\omega)t] \end{aligned} \qquad (4.26)$$

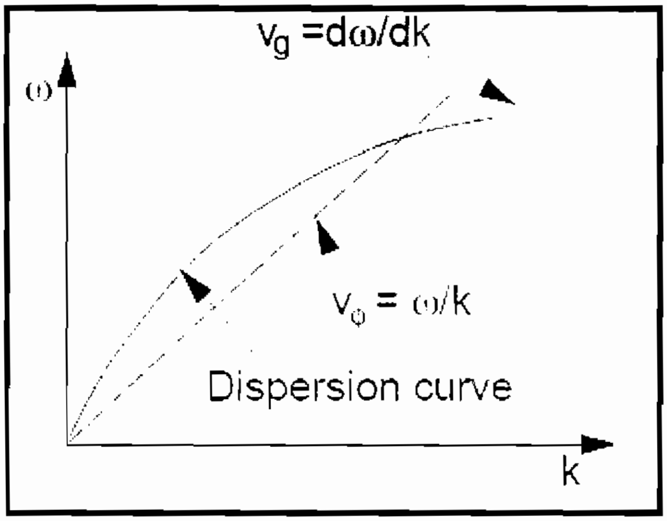
وتختلف هاتان الموجتان عن بعضهما بالتواتر بالمقدار 2، وبما أن كل موجة يجب أن يكون لها سرعة طورية، تتعلق بالوسط الذي تنتشر فيه هذه الموجة، فإنه من المنطقي وجود فرق مقدار 2 في العدد الموجي، بين الموجتين السابقتين. ولنفرض للاختصار:

$$E_1 + E_2 = 2E_0 \cos[(\Delta k)x - (\Delta\omega)t] \cos(kx - \omega t) \qquad (4.27)$$

وهي موجية جيبية معدلة، وهي الموجة الحاملة التي تحمل المعلومات، التي عادة ما تكون مشفرة سواء بتعديل السعة أو الطور. تنتشر هذه الموجة بسرعة المجموعة، وهي لا يمكن أن تساوي سرعة الضوء (c):

$$v_g = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}k} < c \qquad (4.28)$$

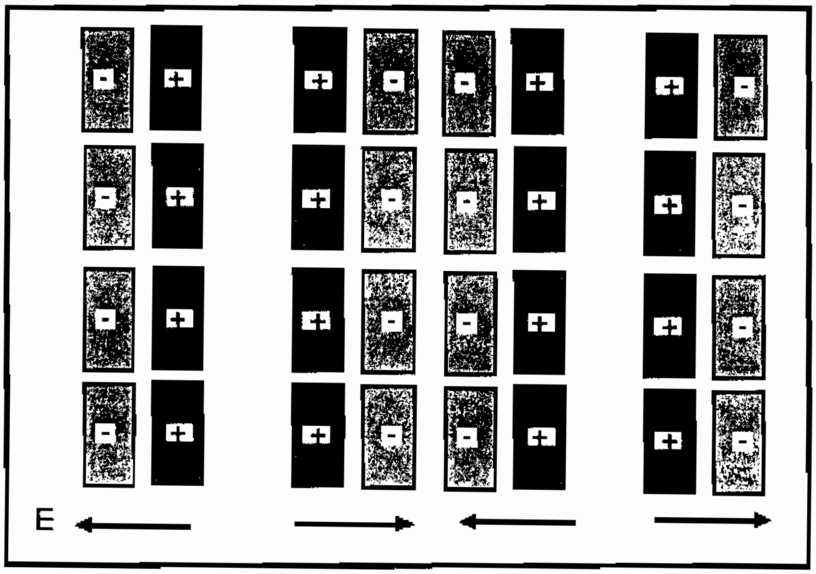
ويمكن أن يوضح التمييز بين السرعة الطورية وسرعة المجموعة من الشكل (٥).



الشكل (٣): السرعة الطورية وسرعة المجموعة لموجة تحدد من علاقة التشتت.

الاهتزازات في البلازما

كما سبق أن أشرنا إلى أن البلازما تحتوي مزيجًا مكونًا من جسيمات معتدلة وجسيمات مثارة وأيونات وإلكترونات، محققة ما يسمى حالة شبه الاعتدال، حيث تحتوي على مزيج من شحنات موجبة وسالبة بمقادير متساوية. تساهم هذه الخاصية في استقرار البلازما، ولكن عندما تخضع هذه البلازما لاضطراب خارجي؛ بحيث يؤدي انحراف هذه المكونات عن وضع اتزانها، تقوم مجالات الشحنات الفراغية المتشكلة داخليًّا؛ نتيجة لهذا الاضطراب إلى زيادة الحركة الجماعية لجسيمات البلازما، أما لقوى الإضراب الخارجية، فإنها فتقوم بتسريع الإلكترونات والأيونات بصورة جماعية، إلا أن الأيونات تبقى عاجزة عن مجاراة الإلكترونات، فتبقى عنها خاضعة بذلك للقصور الذاتي؛ نتيجة كبر كتلتها مقارنة بكتل الإلكترونات؛ مما يؤدي إلى ابتعاد الإلكترونات عن حالة التوازن الأصلية، والتي تقود بدورها نشوء مجالات كهربائية داخلية في الجهة المعاكسة لحركة الإلكترونات. ونسمي تواتر اهتزاز الإلكترونات في هذه الحالة تواتر البلازما، الذي سندرسه لاحقا، وفي الشكل (٤) تمثل المستطيلات البيضاء مانع الأيونات، أما المستطيلات المظلمة، فتمثل مانع الإلكترونات المنزاحة بشكل متناوب.



الشكل (٤): الحركات الاهتزازية لكل من الإلكترونات والأيونات.

تخضع الإلكترونات نتيجة تلك القوى إرجاع ناتجة عن التجاذب الكهربائي لكولون، وبالنتيجة تخضع الإلكترونات تحت تأثير القوى إلى حركة اهتزازية جماعية، ويتوافق هذا الاهتزاز بتواتر عالٍ، كما تعيد الحركة الاهتزازية نفسها بشكل دوري، مترافقة بتزايد أو تناقص الطاقة الحركية لهذه الإلكترونات على حساب الطاقة الكامنة، والعكس بالعكس. إلا أن سعة هذا الاهتزاز لا تبقى ثابتة في الحالة العامة، نتيجة للتصادم بين الإلكترونات والجسيمات المتعادلة، ويترافق هذا التصادم بتخامد جماعي للحركة الاهتزازية، وبالتالي تناقص تدريجي في سعة هذه الحركة الاهتزازية. نحصل من خلال هذه الحركات الاهتزازية على اهتزاز كهربائي ساكن، وسوف نحسب تواتر البلازما ضمن التقريبات التالية:

- عدم وجود مجال مغناطيسي خارجي.
- الطاقة الحرارية معدومة.
- البلازما غير محدودة.
- ثبات الايونات في الوسط الموافق لتوزع منتظم.
- نفرض أن حركة الالكترونات وفق الاتجاه x فقط.

ونستطيع كتابة العلاقات التالية بناءً على التقريبات السابقة:

بالتالي لا يوجد مجال مغناطيسي مهتز، وهذه الاهتزازات هي اهتزازات كهربائية ساكنة.

تعطى معادلة حركة الإلكترونات ومعادلة الاستمرار بالشكل:

$$\nabla = \hat{x}\frac{\partial}{\partial x}; E = E\hat{x} \qquad (4.29)$$

ومعادلة ماكسويل الوحيدة التي سنحتاج إليها، هي التي لا تحوي على المتجه أي المعادلة بواسون. وهي حالة خاصة تطرقنا إليها، عند دراسة البلازما كمائع، وهي تقريب البلازما. وهي لا تفيدنا في إيجاد، وهي حالة تواترات مرتفعة، حيث إننا اعتبرنا القصور الذاتي للإلكترونات عاملاً مهمًّا، والانحراف عن وضع الاستقرار هو العامل المهم في هذه الحالة، وبالتالي نكتب:

$$\epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E} = e(n_i - n_e) \qquad (4.30)$$

يمكن حل المعادلتين (4.28) , (4.30) بسهولة، عبر جعلها خطية، ونفهم من ذلك أن سعة الاهتزاز صغيرة، ويمكن إهمال الحدود، التي لا تحتوي معاملات سعة من درجات مرتفعة؛ حيث نقوم أولاً بفصل المتغيرات إلى قسمين: قسم يمثل الجزء الثابت ونعطيه الدليل 0، وقسم يمثل الجزء المضطرب ونعطيه الدليل 1 أي:

$$n_e = n_0 + n_1 \quad v_e = v_0 + v_1 \quad \mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1 \tag{4.31}$$

$$\begin{aligned} m[\frac{\partial v_1}{\partial t}] &= -e\mathbf{E}_1 \\ \frac{\partial n_1}{\partial t} + n_0 \nabla \cdot v_1 &= 0 \\ \epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E}_1 &= en_i \end{aligned} \tag{4.32}$$

نفرض أن الحدود المهتزة تسلك سلوكا جيبيًّا أي:

$$\begin{aligned} v_1 &= v_1 e^{i(kx-\omega t)}\hat{x} \\ n_1 &= n_1 e^{i(kx-\omega t)} \\ \mathrm{E} &= E e^{i(kx-\omega t)}\hat{x} \end{aligned} \tag{4.33}$$

باستخدام

$$\frac{\partial}{\partial t} \longleftrightarrow -i\omega \quad \nabla \longleftrightarrow i\mathbf{k}$$

وبالتالي، يمكن التعويض عن الاشتقاق بالنسبة للزمن، عندئذ تصبح المعادلات بالشكل:

$$\begin{aligned} -im\omega v_1 &= -eE_1 \\ -i\omega n_1 &= -n_0 ikv_1 \\ ik\epsilon_0 E_1 &= -en_1 \end{aligned} \tag{4.34}$$

ويحذف n_1 و E_1 تصبح المعادلة بالشكل:

$$-im\omega v_1 = -i\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 \omega} v_1 \tag{4.35}$$

ويكون تردد البلازما عندئذ بالشكل:

$$\omega_p^2 = (\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m})^{1/2} \tag{4.36}$$

حيث $n_\circ$: كثافة الالكترونات، m : كتلة الإلكترون.

وبشكل تقريبي، وبعد التعويض في الثوابت المعروفة، نستطيع استخدام العلاقة:

$$f_p \cong 9\sqrt{n} \qquad (4.37)$$

حيث يتعلق هذا التردد فقط في كثافة البلازما، وهو من المتحولات الأساسية لأي بلازما. وبسبب القيمة الصغيرة لـــ m، ويكون تردد البلازما عادة كبيرًا جدًا؛ فمثلاً عندما تكون كثافة البلازما $n = 10^{18} m^{-3}$ يكون التردد:

$$f_p = \omega_p / 2\pi \simeq 9 \text{ GHz}$$

ويقع الإشعاع بتردد نطاق مجال الأمواج الميكرونية (microwave range).

البلازما هي مائع مركب، يدعم عديدًا من أنماط الأمواج في البلازما. تشمل قوى الاسترجاع الضغط الحركي والقوى الكهربائية والمغناطيسية. ظواهر الموجة مهمة لتسخين البلازما، وعدم الاستقرار التشخيصي في الفراغ وغيرها، هناك نمط واحد فقط للموجة، هي الموجة الكهرومغناطيسية وسرعاتها $\omega/k = c$، ولها مركبات B , E عمودية على كل من متجه الموجة k. في الهواء، على حد سواء تنتشر كل من الموجات الصوتية والموجات الكهرومغناطيسية. في البلازما، ستنتشر كلا من الموجات الكهروستاتيكية والموجات الكهرومغناطيسية. في الحالة السالفة الذكر، يكون اضطراب المجال الكهربي المصاحب للموجة موازيًا لاتجاه انتشار الموجة $\mathbf{E}//\mathbf{k}$ ؛ بحيث لا يوجد اضطراب للمجال المغناطيسي المصاحب للموجة:

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = \mathrm{i}\boldsymbol{k} \times \boldsymbol{E} = \mathrm{i}\omega \boldsymbol{B} = 0 \qquad (4.38)$$

بينما تنتشر، في الهواء الموجات الصوتية من خلال الاصطدامات، وفي البلازما عالية التأين، تحدث هذه الاصطدامات عبر المجالات الكهربية للموجة. وهناك مجموعة كبيرة ومتنوعة من أنماط موجات البلازما؛ نظرًا لسرعة الطورية للموجة تعتمد على كل من: تردد الموجة وزاوية انتشارها بالنسبة لخلفية المجال المغناطيسي. الترددات المهمة المميزة، هي: تردد الكترونات البلازما، والتردد السيكلتروني للإلكترونات، والتردد السيكلتروني للأيونات على الترتيب، هي: ω_{pe}، ω_{ce} و ω_{ci}.

الأمواج

بحث أنتشار الموجات الكهرومغناطسية هي من أهم التشخيصات المهمة في المعامل، بالإضافة إلى بلازمات الفضاء؛ حيث توجد تجمعات ضخمة من أشكال الأمواج المختلفة في البلازما الممغنطة.

تتعامل البلازما كوسط عازل مع الموجات الكهرومغناطسية:

- الانعكاس.
- الانكسار.
- امتصاص الأمواج.

تنتقل كل من الطاقة وكمية الحركة بين المجالات والجسيمات، وتؤدي إلى:

- التعجيل.
- التسخين.
- الرنين.

أمواج أيونات البلازما

لدراسة أمواج الأيونات في البلازما، لابد من معرفة انتشار الأمواج الصوتية في الهواء.

الأمواج الصوتية في الهواء

تخضع التغيرات في ضغط وكثافة الهواء للقانون الأدياباتيكي من العلاقة:

$$\frac{\nabla p}{p} = \gamma \frac{\nabla \rho}{\rho}$$

أو

$$\begin{aligned} \nabla p &= \left(\frac{\gamma p}{\rho}\right) \nabla \rho \\ &\equiv v_S^2 \nabla \rho \end{aligned} \qquad (4.39)$$

حيث v_S هي سرعة الصوت الأدياباتيكية:

$$\begin{aligned} v_S &= \left(\frac{\gamma p}{\rho}\right)^{1/2} \\ &= \left(\frac{\gamma k_B T}{m}\right)^{1/2}. \end{aligned} \qquad (4.40)$$

بالتشابه مع ماسبق يمكن رسم ملامح موجات ديناميكا الموائع الممغنطة (MHD)، وهذا يعني الأمواج في المائع الموصل المضغوط في المجال المغناطيسي.

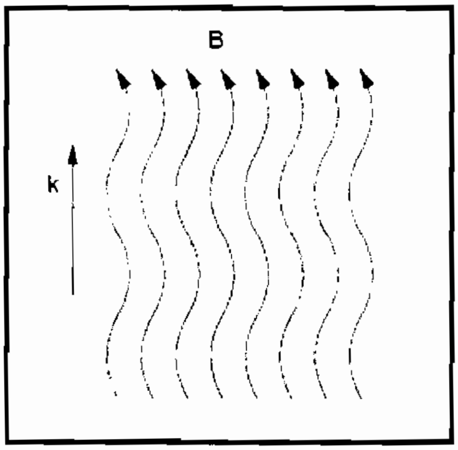
موجات ألفيين Alfv´en

تعاني موائع MHD أوتحس بالشد المغناطيسي B^2/μ_0 على طول خطوط المجال وضغط متماثل $B^2/2\mu_0$، وبالتالي تسلك خطوط المجال كأوتار حاملة كتلاً، وتصبح تحت تأثير شد-، وترتبط جسيمات البلازما بخطوط المجال. وبناء على ذلك، نتوقع أن يعاني المجال المغناطيسي من اضطرابات عابرة، تؤدي إلى ذبذبات أوموجات تنتشر بسرعة

$$V_A = \left(\frac{\text{tension}}{\text{density}}\right)^{1/2} = \left(\frac{B^2}{\mu_0\rho}\right)^{/2}. \qquad (4.41)$$

هذه السرعة تعرف بـ "سرعة ألفيين".

يوضح الشكل (٥) الطبيعة المستعرضة لحركة المائع، وتجمد خطوط القوى المغناطيسية. لاتوجد تقلبات لكل من الضغط والكثافة مصاحبة لهذه الموجة. تسمى هذه الموجة غالبًا التوائية أو موجة القص.

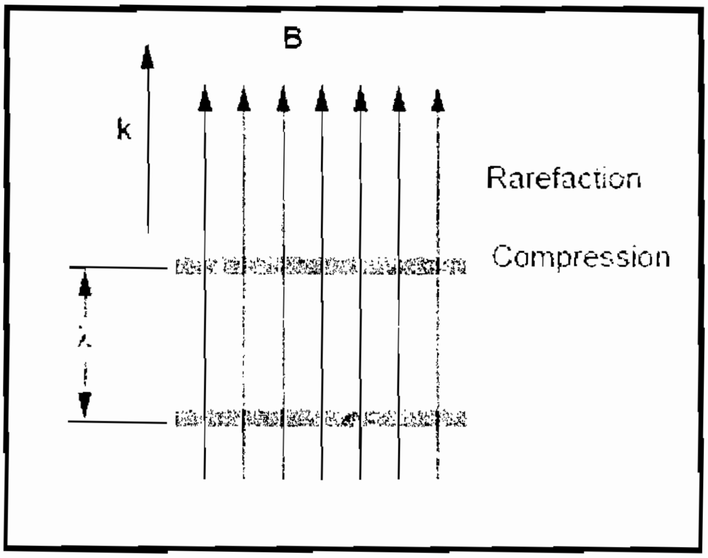


الشكل (٥): موجات أفيين الالتوائية في المائع الموصل المضغوط، وتنتشر على طول خطوط المجال. حركة المائع والاضطرابات المغناطيسية عمودية على خطوط المجال.

أمواج الأيون الصوتية والصوتوممغنطة

بالتشابه أكثر، يتوقع وجود ذبذبات طولية نتيجة تقلبات الضغط لحركة الجسيمات وانتشار الموجة على طول المجال.
لايوجد اضطراب للمجال؛ لأن الجسيمات تتحرك بحرية في الاتجاه الموازي للمجال ($k \parallel B$)، وبناء على ذلك تكون هذه الأمواج تضاغطية، وتسمى أمواج الأيونات الصوتية التي تنتشر بسرعة على طول خطوط المجال كما بالشكل (٦).

$$V_s = \left(\frac{\gamma_e k_B T_e + \gamma_i k_B T_i}{m_i}\right)^{1/2} \qquad (4.42)$$



الشكل (٦): انتشار أمواج الصوت الطولية على طول خطوط المجال B في المائع الممغنط المضغوط.

في الاتجاه العمودي على المجال B، يوجد نوع جديد من الذبذبات الطولية التى تحدث بقوة الإرجاع المغناطيسية (الضغط المغناطيسي)، وهي تعرف باسم الصوتوممغنطة، أو ببساطة موجة تضاغط، التي تتضمن انضغاطًا وتخلخلاً لخطوط القوى المغناطيسية بالإضافة الى البلازما. تنتشر هذه الموجة بسرعة v_A تحقق العلاقة:

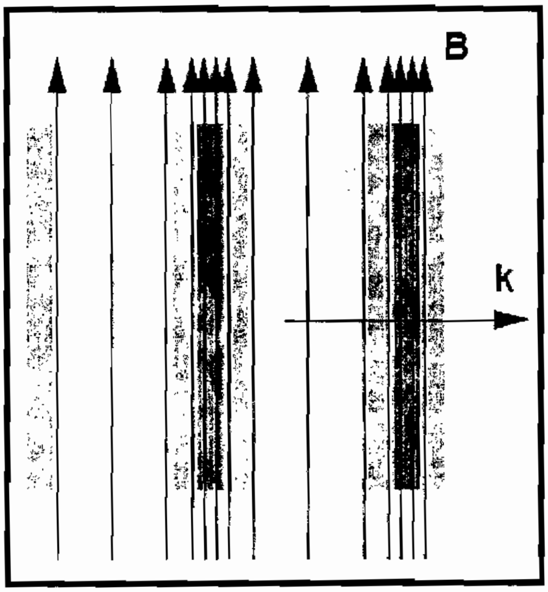
$$\begin{aligned}\nabla\left(p+\frac{B^2}{2\mu_0}\right) &= V_M^2\nabla\rho\\ \Rightarrow V_M^2 &= \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\rho}\left(p+\frac{B^2}{2\mu_0}\right)_{\rho_0} \qquad (4.43)\\ &= V_S^2+\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\rho}\left(\frac{B^2}{2\mu_0}\right)_{\rho_0}\end{aligned}$$

حيث ρ_0 هي كثافة المائع غير المضطرب.

يلاحظ أن الضغط المغناطيسي ضمن قوة الإرجاع. وبما أن الجسيمات مرتبطة بخطوط المجال $B/\rho = B_0/\rho_0$ ، عندئذ نحصل على العلاقة:

$$\begin{aligned}V_M^2 &= V_S^2+\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\rho}\left(\frac{B_0^2\rho^2}{2\mu_0\rho_0^2}\right)_{\rho_0} \qquad (4.44)\\ &= V_S^2+V_A^2\end{aligned}$$

حيث V_A سرعة ألفيين. وطبيعة الموجة الصوتوممغنطة موضحة بالشكل (٧).



الشكل (٧)

الفصل الخامس
الاندماج النووى

الاندماج النووي عملية، تتجمع فيها نواتان ذريتان؛ لتكوين نواة واحدة أثقل. ويلعب اندماج الأنوية الخفيفة مثل البروتون، وهو نواة ذرة الهيدروجين، والديوترون نواة الهيدروجين الثقيل، والتريتيون وهو نواة التريتيوم دوراً هائلاً في العالم وفي الكون؛ حيث تنطلق خلال هذا الاندماج كمية هائلة من الطاقة، تظهر على شكل حرارة وإشعاع، كما يحدث في الشمس (شكل ١)، فتمدنا بالحرارة والنور والحياة. فدون هذا التفاعل، ما وُجدت الشمس وما وُجدت النجوم، ولا حياة من دون تلك الطاقة المسماة طاقة الاندماج النووي. وتنتج تلك الطاقة الهائلة عن فقد في وزن النواة الناتجة عن الاندماج النووي، ويتحول هذا الفقد في الكتلة إلى طاقة؛ طبقاً لمعادلة ألبرت أينشتاين، التي تربط العلاقة بين الكتلة والطاقة. هذا التفاعل هو الذي يغذي الشمس، وبقية النجوم الأخرى في الكون، ويمدهم بالحرارة والضوء.

تكمن فائدة الاندماج النووي في إطلاقه كميات طاقة، أكبر بكثير مما يطلقه الانشطار. وبالإضافة إلى ذلك، فإن المحيطات تحتوي، بشكل طبيعي، على كميات كافية من الدويتريوم اللازم للتفاعل، فإذا أفلح الإنسان في ترويض تلك الطاقة لتغذية الكوكب بالطاقة لمدة آلاف السنين، فإن المواد المنبعثة عن الاندماج (خصوصا الهيليوم ٤)، ليست مواد مشعّة.

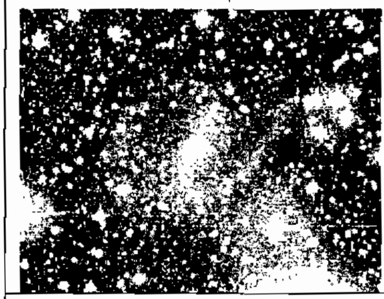
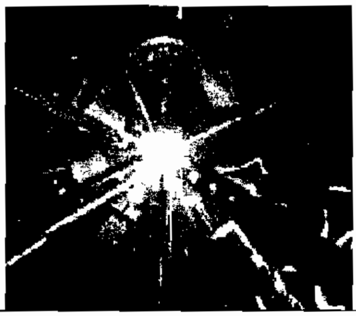
وعلى الرغم من العدد الكبير من التجارب، التي تم القيام بها في كل أنحاء العالم منذ خمسين سنة، فإنه لم يتم التوصل إلى بناء مفاعل يعمل بالاندماج، ولكن الأبحاث في تقدم مستمر لغرض التوصل إلى ذلك. وكل ما استطاع الإنسان التوصل إليه في هذا المجال، جاء في المجال العسكري بابتكار القنبلة الهيدروجينية.

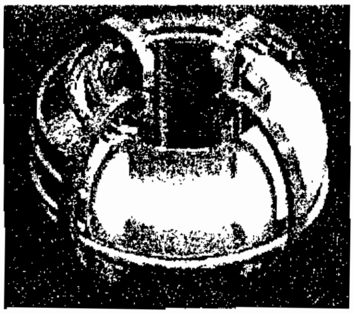


شكل (١): الشمس، مركز تفاعلات اندماج نووية متعدّدة.

حصر البلازما والتسخين

يتطلب الاندماج النووي بلازما كثيفة ذات درجة حرارة عالية، وأطول فترة زمنية ممكنة لتحرير طاقة الاندماج، ويوضح الجدول الآتي ملخصًا لطـرق حصر البلازما، وآلية تسخينها وبعض الأمثلة.

طريقة الحصر	آلية التسخين	صورة لنموذج
الجاذبية	انضغاط (الجاذبية) التفاعلات الاندماجية (مثل سلسلة تفاعل بروتون مع بروتون)	النجوم والمجرات 
القصور الذاتي	انضغاط (انفجار ضـمني منقـاد بحزم الليزر أو بالأشعة السـينية من الليزر أو حزم من الأيونات) التفاعلات الأندماجية (الديوتيريوم - تريتيوم)	تفاعل حزم الليزر مع كريات من الدويتريوم الصلب 

طريقة الحصر	آلية التسخين	صورة لنموذج
المغناطيسية	موجات كهرومغناطيسية تسخين أومي (بالتيار الكهربي) حزم الجسيمات المتعادلة (الهيدروجين الذري) انضغاط (بالمجالات المغناطيسية) التفاعلات الاندماجية (الديوتيريوم – تريتيوم)	التوكاماك 

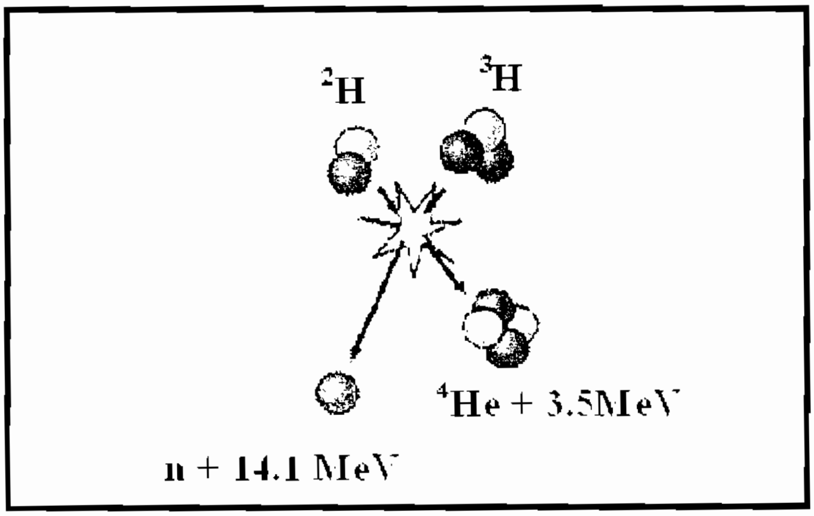
آلية الإندماج

يحدث تفاعل الاندماج النووي، عندما تتداخل نواتان ذريتان. ولكي يتم هذا التداخل، لا بد من أن تتخطى النواتان التنافر الحاصل بين شحنتيهما الموجبتين (وتعرف الظاهرة بالحاجز الكولومبي). إذا ما طبقنا قواعد الميكانيكا الكلاسيكية وحدها، سيكون احتمال الحصول على اندماج الأنوية منخفضًا للغاية، بسبب الطاقة الحركية (الموافقة للهيجان الحراري) العالية جدًا اللازمة؛ لتخطي الحاجز المذكور. وفي المقابل، تقترح ميكانيكا الكم، وهو ما تؤكده التجربة، أن الحاجز الكولومبي يمكن تخطيه أيضًا بظاهرة النفق، بطاقات أكثر انخفاضا.

وعلى الرغم من ذلك، فإن الطاقة اللازمة للاندماج تبقى مرتفعة جدًا، وهو ما تقابله حرارة أكثر من عشرات، أو ربما مئات الملايين من الدرجات المئوية حسب طبيعة الأنوية. وفي داخل الشمس على سبيل المثال، يجري تفاعل اندماج الهيدروجين المؤين عبر مراحل إلى تولد الهليوم، في ظل حرارة تقدر بـ ١٥ مليون درجة مئوية، ويحدث ذلك ضمن عدة تفاعلات مختلفة، تنتج عنها حرارة الشمس. وتُدرس بعض تلك التفاعلات بين نظائر الهيدروجين بغرض إنتاج الطاقة عبر الاندماج مثل الديوتيريوم- ديوتيريوم أو الديوتيريوم-تريتيوم (انظر شكل ٢). أما في الشمس، فتتواصل عملية الاندماج إلى العناصر الخفيفة ثم المتوسطة، ثم ينتج منها العناصر الثقيلة مثل الحديد، الذي يحتوي في نواته على ٢٦ بروتون، ونحو ٣٠ من النيوترونات.

وفي بعض النجوم الأكثر كتلة عن الشمس، تتم عمليات اندماج لأنوية أضخم، تحت درجات حرارة أكبر.

وعندما تندمج أنوية صغيرة، تنتج نواة غير مستقرة، تسمي أحيانًا نواة مركبة. ولكي تعود إلى حالة استقرار ذات طاقة أقل، تُطلق جسيمًا أو أكثر (فوتون، نيوترون، بروتون، على حسب التفاعل). وتتوزع الطاقة الزائدة بين النواة والجسيمات المطلقة في شكل طاقة حركيّة. وطبقاً للرسم التوضيحي، تنطلق نواة ذرة الهيليوم بطاقة قدرها 3.5MeV، وينطلق النيوترون بطاقة قدرها 14.1MeV. وفي المفاعلات الاندماجية الجاري تطبيقها حاليًا، يجتهد العلماء للحصول على مردود جيد من الطاقة خلال الاندماج، أي من الضروري أن تكون الطاقة الناتجة أكبر من الطاقة المستهلكة؛ لتواصل التفاعلات واستغلال الحرارة الناتجة في إنتاج الطاقة الكهربائية. كما يجب عزل محيط التفاعل ومواد المحيط في المفاعلات الاندماجية. عندما لا يوجد أي وضع مستقر، تقريبا، قد يكون من المستحيل أن نقوم بإدماج نواتين.



شكل (٢)

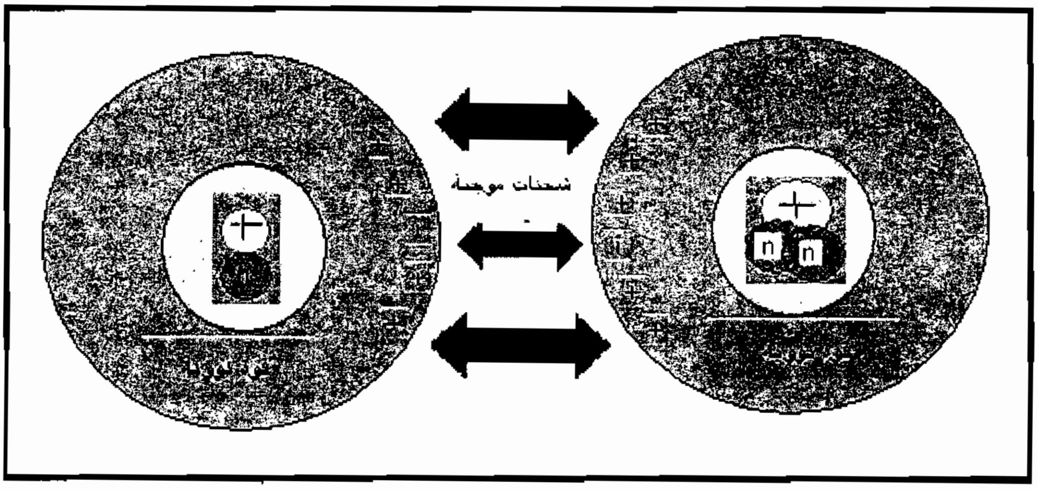
إن التفاعلات الاندماجية التي تطلق أكبر قدر من الطاقة، هي تلك التي تستخدم أكثر الأنوية خفّة لإنتاج الهيليوم؛ لأن الهيليوم ونواته جسيم ألفا هي أقوى نواة ذرة على الإطلاق من جهة تماسكها، فهي تحتوي على ٢ بروتون و ٢ نيوترون وهؤلاء الأربعة شديدو التماسك؛ بحيث يتحول جزء يعادل ٠٫٠٠٥ من كتلتهم، كما في التفاعل الموضح بالرسم، إلى طاقة حركة تتوزع بين نواة

الهيليوم الناتجة والنيوترون. ومجمـوع الطـاقتين المـوزعتين = 3.5+14.1 =17.6MeV ، وبالتالي فإن أنوية الدويتيريوم (بروتون واحد ونيوترون واحد) والتريتيوم (بروتون واحد ونيوترونان)، مستخدمة في التفاعلات التالية:

- دويتيريوم + دويتيريوم -> هيليوم ٣ + نيوترون
- دويتيريوم + دويتيريوم -> تريتيوم + بروتون
- دويتيريوم + تريتيوم -> هيليوم ٤ + نيوترون
- دويتيريوم + هيليوم ٣ -> هيليوم ٤ + بروتون

وهذه التفاعلات هي أكثر التفاعلات دراسة في المخابر، عند تجارب الاندماج المراقبة، وينتج كل منها نحو 17MeV من الطاقة.

حاجز الجهد الفعلي للقوى الكهروستاتيكية، هو السائد قبل حدوث الاندماج عند المسافات الكبيرة. تتنافر الأنوية المجردة من الإلكترونات مع بعضها بـسبب قوى التنافر الكهروستاتيكية بين البروتونات الموجبة الشحنة، إذا اقتربت هذه الأنوية من بعضها؛ بحيث تتغلب قوى التجاذب النووى على قـوى التنـافر الكهروستاتيكية. يحدث الاندماج وتحرر النيوترونات، ويبين الشكل أسفل عند المسافات القصيرة، كيف تصبح قوى التجاذب النووية أكبر من قوى التنـافر الكهروستاتيكية



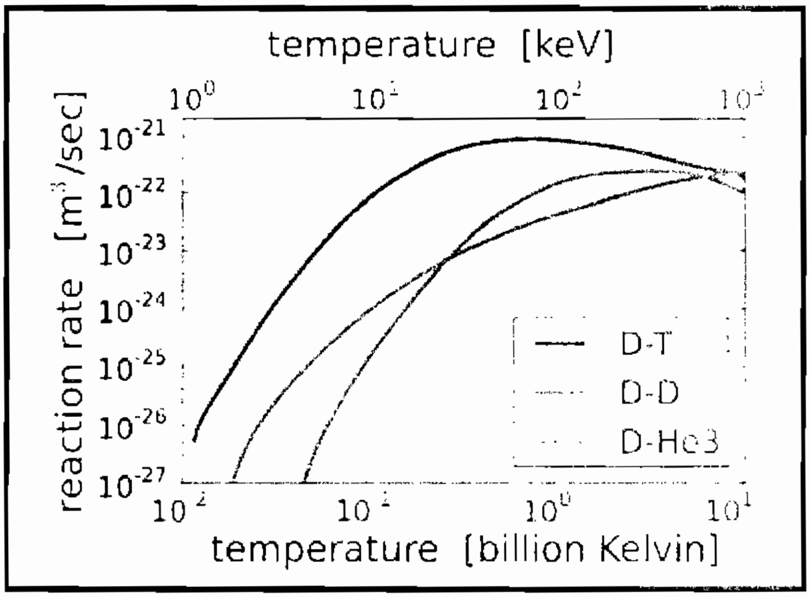
شكل (٣): عند المسافات القصيرة، تصبح قوى التجاذب النووية أكبر من قوى التنافر الكهروستاتيكية.

الاندماج المتحكم فيه

يمكن التفكير في عدة طرق، تمكّننا من احتجاز محيط التفاعل للقيام بتفاعلات اندماج نووية، ويقوم العلماء فعلاً بتلك التجارب بواسطة الاحتجاز المغناطيسي، لما يسمى *البلازما* في جهاز مفرغ من الهواء، مع رفع درجة حرارة البلازما إلى عشرات الملايين درجة مئوية. ولكن احتجاز البلازما - وهي أنوية التريتيوم والديوتيروم الخالية من الإلكترونات - تحت هذه الحرارة العالية صعب جدًّا؛ إذ إنها كلها تحمل شحنة كهربائية موجبة، تجعلهم يتنافرون عن بعضهم. فما يلبث التفاعل أن يبدأ بينهم لمدة أجزاء من الثانية؛ حتى يتنافروا ويتوقف التفاعل. وينصب اهتمام العلماء حاليا على ابتكار وسيلة، يستطيعون بها إطالة مدة انحصار البلازما، وإطالة مدة التفاعل. وتلك المجهودات ما هي إلا بغرض استغلال طاقة الاندماج النووي لإنتاج الطاقة الكهربائية.

بلازما الإندماج

يزداد معدل التفاعل الاندماجي سريعًا بزيادة درجة الحرارة؛ حتى يصل الى اقصى قيمة، ثم ينخفض تدريجيًا. القيمة العظمى لمعدل التفاعل D-T عند درجات حرارة منخفضة (حوالي ٧٠ كيلو الكترون فولت أو ٨٠ مليون كلفن)، مقارنة مع القيم العظمى لمعدل التفاعلات الأخرى مثل (D-He3 & D-D)، التي تحتاج الى درجات حرارة أعلى (انظر الشكل ٤).



شكل (٤): رسم بياني يوضح العلاقة بين درجة الحرارة، ومعدل التفاعل لثلاثة أنواع من التفاعلات الاندماجية.

عندما تصل الحرارة الدرجة التي يحصل فيها الاندماج، تكون المادة في حالة بلازما. إنها حالة خاصة للمادة الأولية، تكوّن فيها الذرات أو الجزيئات غازًا أيونيًّا.

تحت درجات الحرارة العالية، يتم اقتلاع إلكترون أو أكثر من السحابة الإلكترونية المحيطة بكل نواة؛ مما ينتج عنه أيونات موجبة وإلكترونات طليقة.

ينتج عن التحرك الكبير للأيونات والإلكترونات داخل بلازما حرارية، عدة اصطدامات بين الجسيمات الموجبة الشحنة الكهربية. ولكي تكون هذه الاصطدامات قوية بما فيه الكفاية لإنشاء تفاعل اندماجي، تتدخل ثلاثة عوامل:

١. الحرارة T؛

٢. الكثافة N؛

٣. زمن الاحتجاز τ.

حسب لوسون، فإن المعامل $N\tau$ يجب أن يصل حدا فاصلا للحصول على الـ *breakeven*؛ حيث تكون الطاقة الناتجة عن الاندماج مساوية للطاقة المستخدمة. يحدث الإيقاد إثر ذلك في مرحلة أكثر إنتاجًا للطاقة (لم يتوصل العلماء لإيجادها حتى اليوم في المفاعلات التجريبية الحالية). إنه الحد الذي يكون التفاعل على إثره قادرًا على المواصلة من تلقاء ذاته، دون انقطاع. لتفاعل ديتوريوم + تريسيوم، يقدّر هذا الحد بـ 10^{14} ثانية/سم^3.

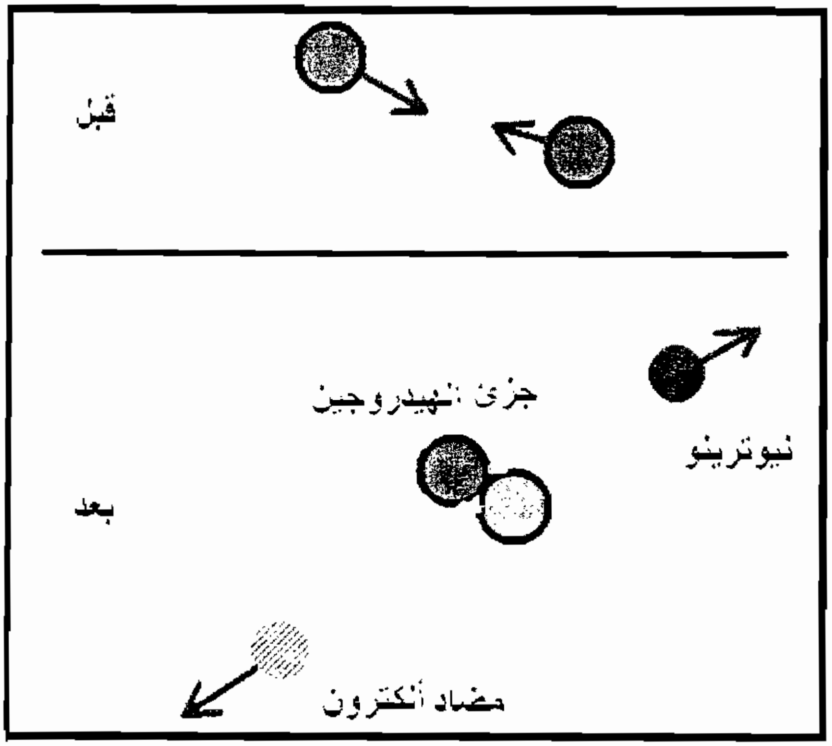
الاندماج في الشمس خطوة بخطوة

تفاعلات الاندماج النووي العامّ

الخطوة الأولى

ينتج عن تفاعل بروتون مع بروتون جزئ الهيدروجين، ومضادّ إلكترون ونيوترينو، كما هو موضح بالمعادلة (١)، والشكل (١):

$$^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + \text{antielectron} + \text{neutrino} \qquad (1)$$



الشكل (٥)

هذه الخطوةِ مستحيلةُ تقريباً.

تَنافرُ البروتونات مع بعضها البعض؛ لأن لكليهما نفس الشحنة (موجبة)، كما يَجِبُ أنْ تصبح خلال مسافة 10^{-15} m بعضها البعض للتفاعلاتِ القويةِ لإحتِجازها.

يَجِبُ أنْ تتحولَ إحدى هذه البروتوناتِ إلى نيوترون (تَنْبَعِثُ مضادَ ألكترون ونيوترينوَ)، وهذا يَتطلّبُ تفاعلاً ضعيفًا. ولكن فرصةَ حدوث هذا التفاعلِ الضعيفِ فقط، عندما تصبح المسافات بين البروتونات تقريباً صفر. ويستحيل أن يتحقق هذا القُرْب إلا بشرطين:

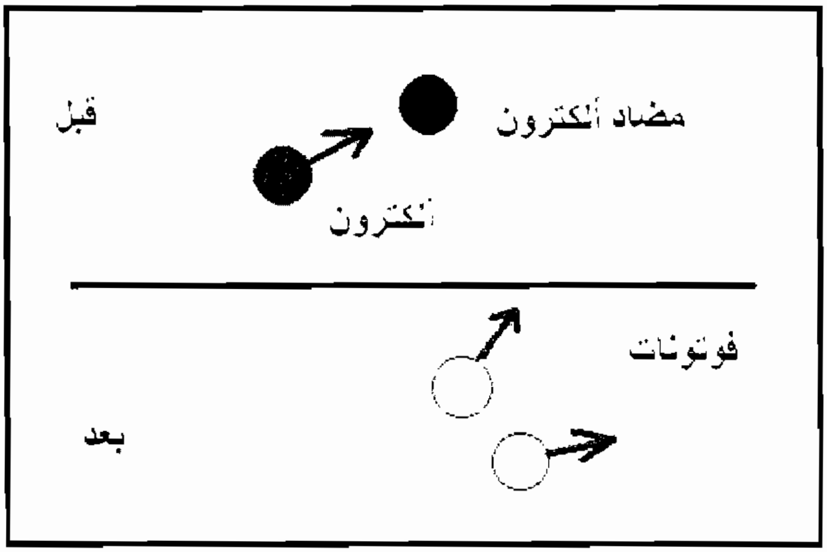
١- يَجِبُ أنْ يَكُونَ الغاز حارًا جدًا؛ لكي تتصادم البروتونات مع بعضها البعض بالسرعةِ العاليةِ، وهذا يجعلهم يَقتربونَ إلى بعضها البعض، على الرغم من أنَّ يَصدّوا بعضها البعض.

٢- رغم ذلك، فإن حدوث هذا التفاعل أمر نادرٌ جداً. ولهذا السبب ما زالَتْ الشمس تَحترقُ بعد ٤,٦ بليون سنةٍ!

الخطوة الثانية

نتج عن تفاعل ألكترون مع مضادَ ألكترون، الفوتونين (تمتص هذه الفوتوناتِ ذات الطاقةِ العاليةِ بواسطة الغاز، وفي النهاية تَعطي الكثير مِنْ الفوتوناتِ ذات الطاقةِ المنخفضةِ)، ويتلاشى كلاهما، كما هو موضح بالمعادلة (٢)، والشكل (٢)

electron + antielectron --> photon + photon (2)

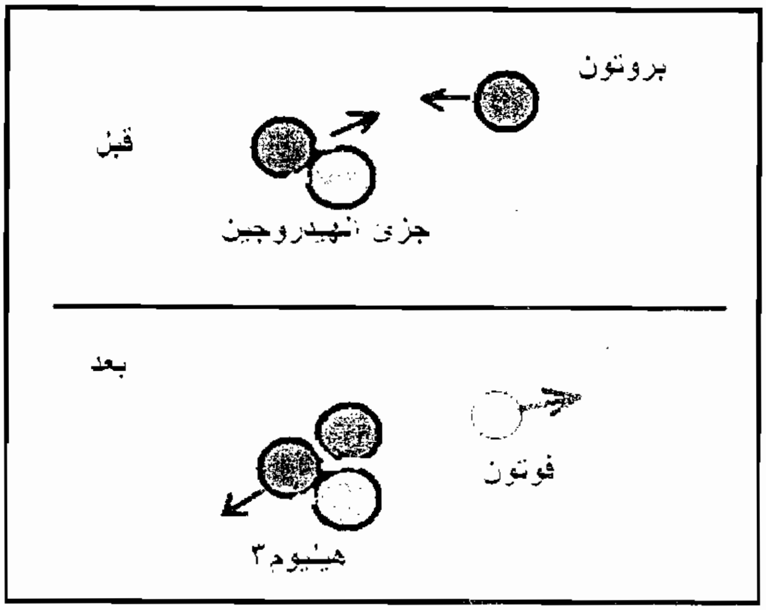


الشكل (٦)

الخطوة الثالثة

تفاعل بروتون مع جزئ الهيدروجين ينتج عنه نواة هيليوم ٣، وفوتون واحد، كما هو موضح بالمعادلة (٣) والشكل (٣):

$$^{2}H + ^{1}H \rightarrow ^{3}He + photon \qquad (3)$$

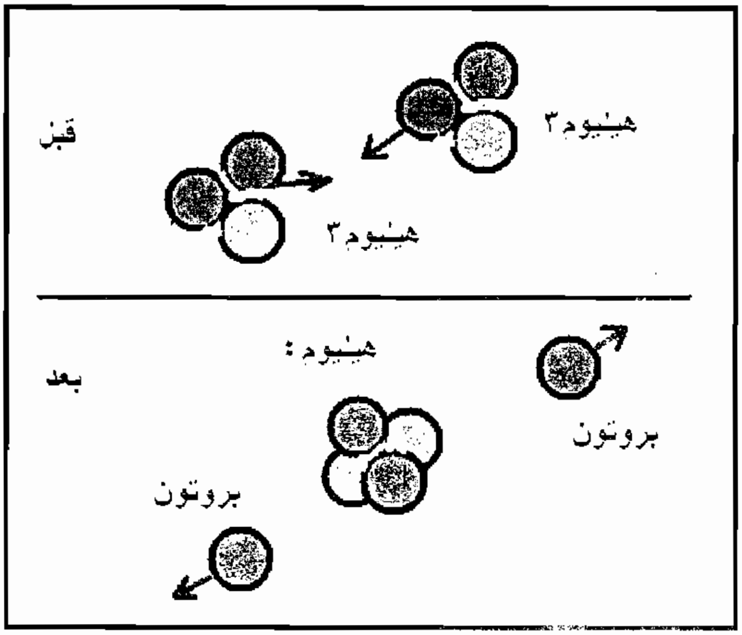


الشكل (٧)

الخطوة الرابعة

تفاعل هليوم٣ مع هيليوم ٣ ينتج عنه نواة هيليوم٤، وعدد ٢ بروتون، كما هو موضح بالمعادلة (٤) والشكل (٤):

$$^{3}He + ^{3}He \rightarrow ^{4}He + ^{1}H + ^{1}H \qquad (4)$$



الشكل (٨)

الخطوات من ١ – ٣ تتكرر مرتين، أما الخطوة ٤ مرة واحدة.

محصلة النتائج هي:

$^{1}H + {}^{1}H \text{ --> } {}^{2}H$ + antielectron + neutrino
$^{1}H + {}^{1}H \text{ --> } {}^{2}H$ + antielectron + neutrino
electron + antielectron --> photon + photon
electron + antielectron --> photon + photon
$^{2}H + {}^{1}H \text{ --> } {}^{3}He$ + photon
$^{2}H + {}^{1}H \text{ --> } {}^{3}He$ + photon
$^{3}He + {}^{3}He \text{ --> } {}^{4}He + {}^{1}H + {}^{1}H$

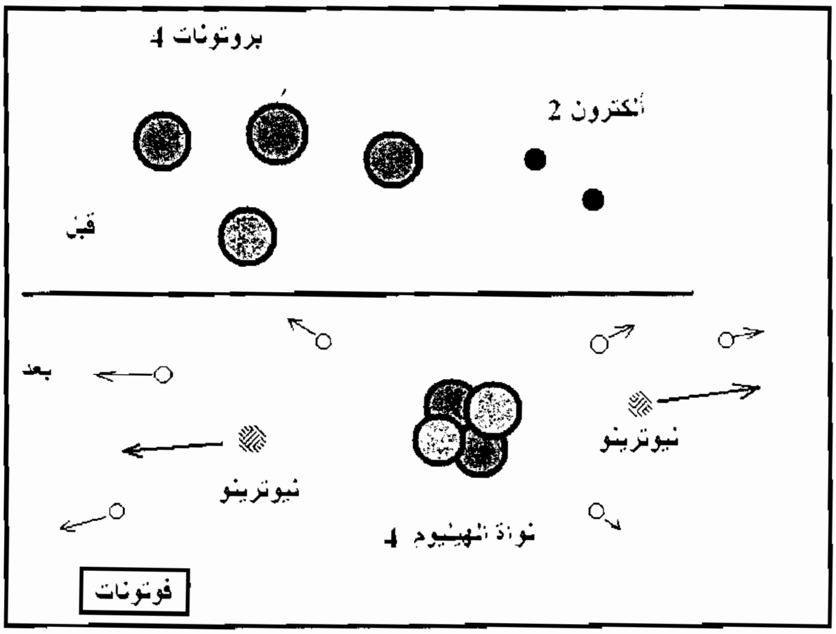
That is

$6\ {}^{1}H + 2\ e \text{ --> } {}^{4}He + 2\ {}^{1}H$ + 2 neutrinos + 6 photons

or

$4\ {}^{1}H + 2\ e \text{ --> } {}^{4}He$ + 2 neutrinos + 6 photons (5)

عند تفاعل عدد أربعة من البروتونات مع اثنين من الإلكترونات، تنتج نواة الهيليوم، واثنان من النيوترينو، وعدد ٦ من الفوتونات، ومحصلة الطاقة المتحررة من هذا التفاعل ٢٦ ميغا إلكترون فولت بروتون، كما هو موضح بالمعادلة (٥) والشكل (٥).

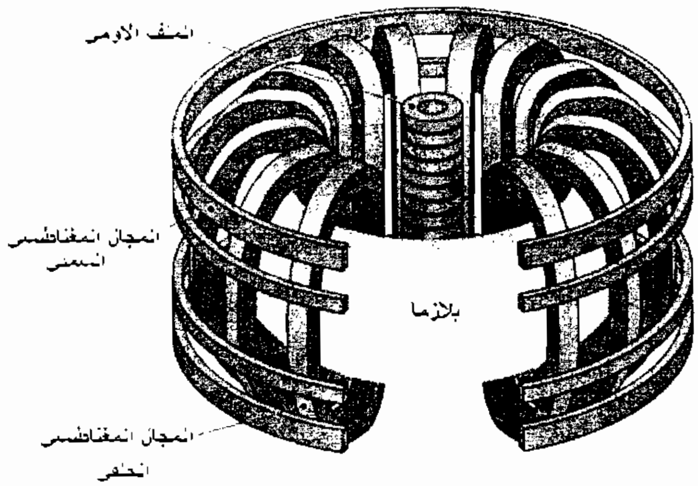


الشكل (٩)

لا تذهب الفوتونات ذات الطاقةِ العاليةِ التي أُنتِجتْ بالعمليةِ النوويةِ بعيدًا، بل إنها تمتص بواسطة الغاز، وتؤدي إلى تسخينهَ. ويَبْقى الهيليومُ في منتصفِ الشمسِ. وتهرب النيوترينوات بسهولة خارج الشمسِ.

التوكاماك Tokamak

التوكاماك نوع من أنواع المفاعلات النووية الاندماجية، وطريقة من طرق بناء هذه المفاعلات (انظر شكل ١٠). ما زالت هذه الطريقة قيد البحث والتجربة، ولم تصل إلى مرحلة الاستغلال الاقتصادي بعد. تعمل هــذه الطريقــة عــن طريق رفع درجة حرارة بلازما إلى درجة الاندماج النووي. وبما أن البلازما ذات درجة حرارة عالية جدًّا، فإنه يجب فصلها وإبعادها، وجعلها لا تلامــس مكونات المفاعل، وإلا أتلفته، وتسبب ذلك في برودتهــا، وانقطــاع التفاعــل الاندماجي. يتم في المفاعلات، المبنية على طريقة توكاماك، جعل البلازمــا تطفو وسط المفاعل، دون أن تلامس أيا من أجزائه عــن طريــق مجــالات مغناطيسية، تحافظ على البلازما في مسار دائري. وفي الوقت الراهن تتمثــل الصعوبات أمام هذا النوع من المفاعلات، في الحفاظ على تواصل التفاعــل الاندماجي؛ أي على حرارة البلازما؛ حيث إن اختلاف السرعة في طبقــات البلازما الداخلية والخارجية يسبب تداخلات، تقلل من درجة الحــرارة؛ ممــا يتطلب جعل الحقل المغنطيسي أو القوة المغناطيسية في شكل لولبي. وهذا يتم عن طريق ضخ تيار كهربائي في البلازما، والذي يساهم في رفــع درجتهــا قليلاً، بغض النظر عن تقليل الخسائر الناتجة عن التداخلات. كما أن تبريــد المفاعل أيضًا لا يسمح بتشغيل متواصل له بل فقط، بعمل متقطع نبضي. كل هذا أدى إلى أنه حاليًا في أفضل الأحوال، يمكن فقط استرداد كمية الطاقــة، التي تصرف لتشغيل المفاعل؛ أي إنه لا يصلح لإنتاج الكهرباء، إلا أن بعض المفاعلات التجريبية في المستقبل تريد أن تبرهن على إمكانة إنتاج طاقة أكبر من تلك الطاقة اللازمة لتشغيلها.



شكل (١٠) التوكاماك

الظروف الملائمة للتفاعل الاندماجي

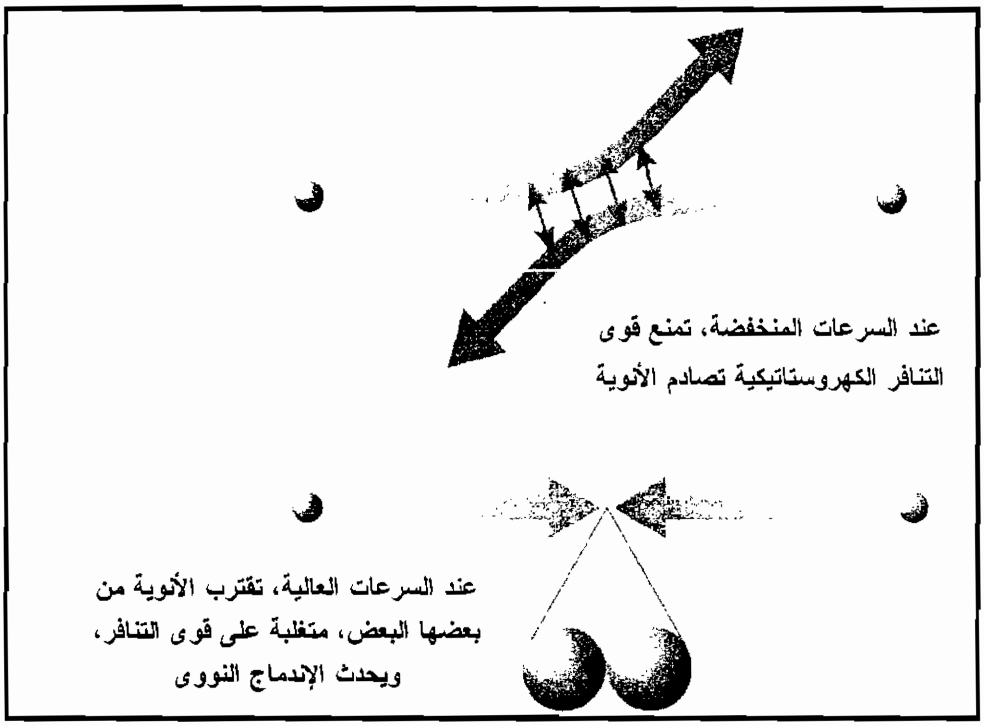
ضرورة تحقيق البارامترات الثلاث (درجة الحرارة وكثافة البلازما والفترة الزمنية للحصر) في آنٍ واحد، كشرط لحدوث استمرارية الاندماج في البلازما. ويطلق على حاصل ضرب هؤلاء (أو الثلاثي) نــاتج الانــدماج، وبالنــسبة لحدوث اندماج D-T ، فإن هذا الناتج يجب أن يتجاوز كمية معينة – المشتق من معيار لوسون؛ نسبة الى العالم البريطاني جون لوسون، الذي أتم صياغته في عام ١٩٥٥. تحقيق الظروف الملائمة لتلبية معيار لوسون يضمن تجاوز نقطة تعادل البلازما – وهي النقطة، التي تتجاوز فيها قدرة الاندماج القــدرة المطلوبة للتسخين، والإبقاء على البلازما.

درجة الحرارة

تحدث التفاعلات الاندماجية بمعدل كافٍ، فقط عند درجات حرارة عالية جدًّا – عندما تتغلب ايونات البلازما، ذات الشحنة الموجبة، على قــوى التنــافر الطبيعية فيما بينها (شكل ١١). عادة، في المفاعل JET، هناك حاجة إلى أكثر من ١٠٠ مليون كلفن لحدوث تفاعل انــدماجي D-T، وتتطلــب التفــاعلات الاندماجية الأخرى (مثل D-D، $D - He^3$) درجات حرارة أعلى من ذلك.

الكثافة

يتناسب عدد التفاعلات الأندماجية لكل وحدة حجم تقريبًا مع مربع الكثافة، لذا يجب أن تكون كثافة أيونات الوقود كبيرة بما فيه الكفاية؛ لكي تأخذ التفاعلات الاندماجية مكانها بالمعدل المطلوب. يتم تقليل الطاقة المتولدة بالانــدماج، إذا خفف الوقود بذرات الشوائب، أو تراكم أيونــات الهليــوم مــن التفــاعلات الاندماجية في حد ذاتها. كلما تم حرق أيونات الوقود في عملية الاندماج يجب الاستعاضة عنها بوقود جديد ومنتجات الهليوم (الرماد) يجب إزالتها.



شكل (١١)

فترة حصر الطاقة

فترة حصر الطاقة هي مقياس لمدى طول فترة الإبقاء على الطاقة في البلازما، قبل أن تضيع. وتعرف على أنها النسبة بين الطاقة الحرارية الموجودة في البلازما، ومدخلات الطاقة؛ المطلوبة للحفاظ على هذه الظروف. في جهاز الجيتت (JET) على سبيل المثال (انظر الشكل ١٢)، تستخدم المجالات المغناطيسية لعزل البلازما الساخنة جدًّا من جدران الوعاء، البارد نسبيًا؛ من أجل الحفاظ على الطاقة لأطول فترة ممكنة. ويقتصر جزء كبير من فقد البلازما المحصورة مغناطيسيا على الإشعاع. تزداد الفترة الزمنية للحصر بشكل كبير مع حجم البلازما (تحتفظ الأحجام الكبيرة بالحرارة أفضل بكثير من الأحجام الصغيرة) -- مثال ذلك الشمس، فترة حصر الطاقة بها هائل.

لحدوث الاندماج النووي، لابد من تحقيق ظروف البلازما التالية في آنٍ واحد.

درجة الحرارة البلازما : ١٠٠-٢٠٠ مليون كلفن.

وقت الحجز : ٤-٦ ثوانٍ.

الكثافة في مركز البلازما: $1-2\times10^{20}m^{-3}$.

علما بأن البلازما ذات الكثافة العالية تتطلب زمن حصر أقصر، ولكن من الصعب للغاية تحقيق كثافة البلازما العالية، في المجالات المغناطيسية الواقعة.

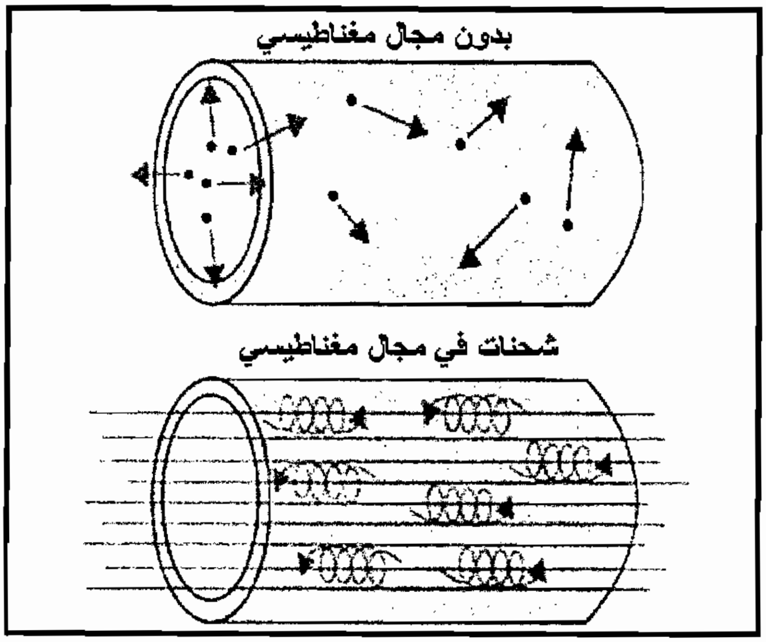


شكل (١٢): تجربة JET – صورة البلازما من كاميرا الفيديو CCD (من وراء نافذة كوارتز).

حصر البلازما مغناطيسيا

بما أن البلازما تضم الجسيمات المشحونة: الأيونات (الموجبة) والإلكترونات (السالبة)، يمكن استخدام المجالات المغناطيسية القوية لعزل البلازما من جدران وعاء الاحتواء – وبالتالي يمكن تسخين البلازما في درجات حرارة أكثر من ١٠٠ مليون كلفن. تقلل هذه العزلة للبلازما من فقدان الحرارة عن طريق التوصيل للوعاء، وتعمل أيضا على تقليل الشوائب من جدران الوعاء في قلب البلازما، التي من شأنها أن تلوثها، وكذلك تعمل على تبريدها بالإشعاع.

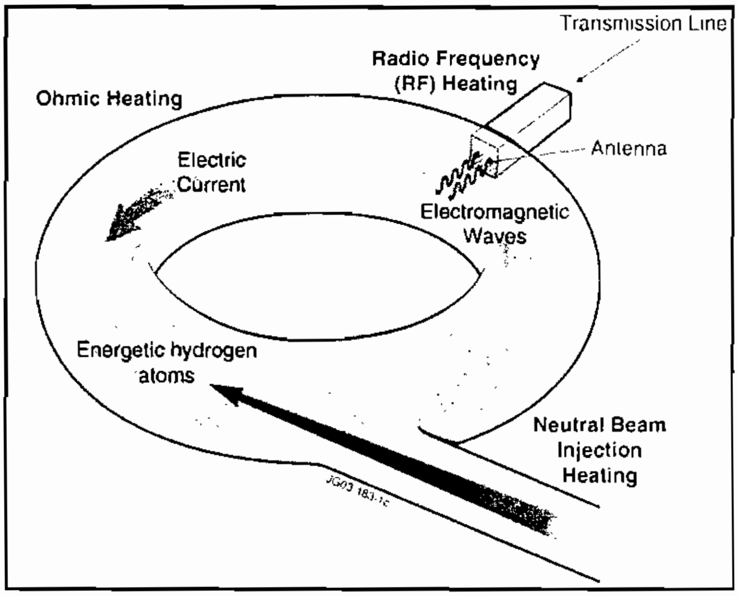
في المجال المغناطيسي، تضطر جزيئات البلازما المشحونة في التدويم على طول خطوط الحقل المغناطيسي (انظر الشكل ١٣). تكون نظم الحصر المغناطيسي الواعدة حلقية (على شكل حلقة)، وهؤلاء أكثرهم تقدمًا هو التوكاماك. حاليا، أكبر توكاماك في العالم، هو JET الجيت في المملكة المتحدة، على الرغم من أن آلة المستقبل (الأيتر) ستكون أكبر من ذلك.



شكل (١٣)

تسخين البلازما

أحد المتطلبات الرئيسية للاندماج هو تسخين جزيئات البلازما لدرجات حرارة عالية جدًا. وعادة ما تستخدم الأساليب التالية لتسخين البلازما، ويعمل كل منهم على متن أكبر مفاعل اندماجي، وهو الجيت (الجهاز الحلقي الأوربي المشترك). انظر الشكل (١٤)



الشكل (١٤)

التسخين الأومي

تصل قيم التيار إلى ٥ ملايين أمبير في بلازما الجيت JET - عادة عن طريق المحولات أو الملف اللولبي؛ فضلا عن توفير القبص الطبيعي للعمود البلازما بعيدًا عن الجدران، وارتفاع درجات الحرارة البلازما - عن طريق تنشيط إلكترونات وأيونات البلازما في اتجاه حلقي، باستخدام قليل من الميجا واط من قدرة التسخين.

التسخين بحقن الجسيمات المحايدة

يتم حقن سيالات من ذرات الديوتيريوم أو التريتيوم المحايدة، ذات الطاقة العالية في البلازما، وتنتقل الطاقة من السيالات إلى البلازما، خلال التصادم مع أيونات البلازما. ويتم إنتاج السيالات المحايدة في مرحلتين متميزتين. أولاً، يتم إنتاج حزم من الأيونات النشطة، من خلال تطبيق جهد تعجيل، يصل إلى ١٤٠ ألف فولت. ومع ذلك، فإن سيل الأيونات المشحونة لن يكون قادرًا على اختراق المجال المغناطيسي في التوكاماك. وبالتالي، فإن المرحلة الثانية تضمن للحزم المعجلة إتمام تحييدها (أي أن الأيونات تحولت إلى ذرات حيادية) قبل الحقن في البلازما. وتصل القدرة الإضافية المتاحة في الجيت JET إلى ٢١ ميجاوات من أنظمة تسخين حقن الجسيمات المحايدة.

التسخين بالترددات الراديوية

عند حصر البلازما بالمجالات المغناطيسية، تدور الأيونات والإلكترونات حول خطوط المجال المغناطيسي في التوكاماك، وتردد الموجات الكهرومغناطيسية، التي تتوافق مع ترددات الأيونات أو الإلكترونات قادرة على حدوث رنين، أو اضمحلال لقدرة الموجات، داخل جسيمات البلازما في حالة عدم التوافق. عند حدوث الرنين، يتم نقل الطاقة من موجات الراديو إلى البلازما، وبالتالي يتم تسخينها، وهذه الطريقة تتطلب قدرة تسخين تصل إلى ٢٠ ميجا واط.

في توكاماك الجيت JET، يتم وضع عدد من الهوائيات في وعاء التفريغ لبث موجات، تنتشر في مدى التردد من ٢٥-٥٥ ميجاهرتز في قلب البلازما. وهذه الموجات يتم ضبطها لحدوث رنين لاسيما مع أيونات البلازما - وبالتالي يتم تسخينها، وتتطلب هذه الطريقة ضخ قدرة تصل إلى ٢٠ ميجا واط.

أيضا يمكن أن تستحث هذه الموجات تيارات في البلازما، من خلال توفير "دفع" الإلكترونات، لعبورها في اتجاه واحد معين. في الجيت، يستخدم ما يقرب من ١٠ ميجاواط من هذه الموجات الميكرونية، التي تسمى الهجين السفلى (٣,٧ ميجاهيرتز)؛ لتعجيل الإلكترونات البلازما لتوليد تيار بلازما، يصل إلى ٣ ميجاواط.

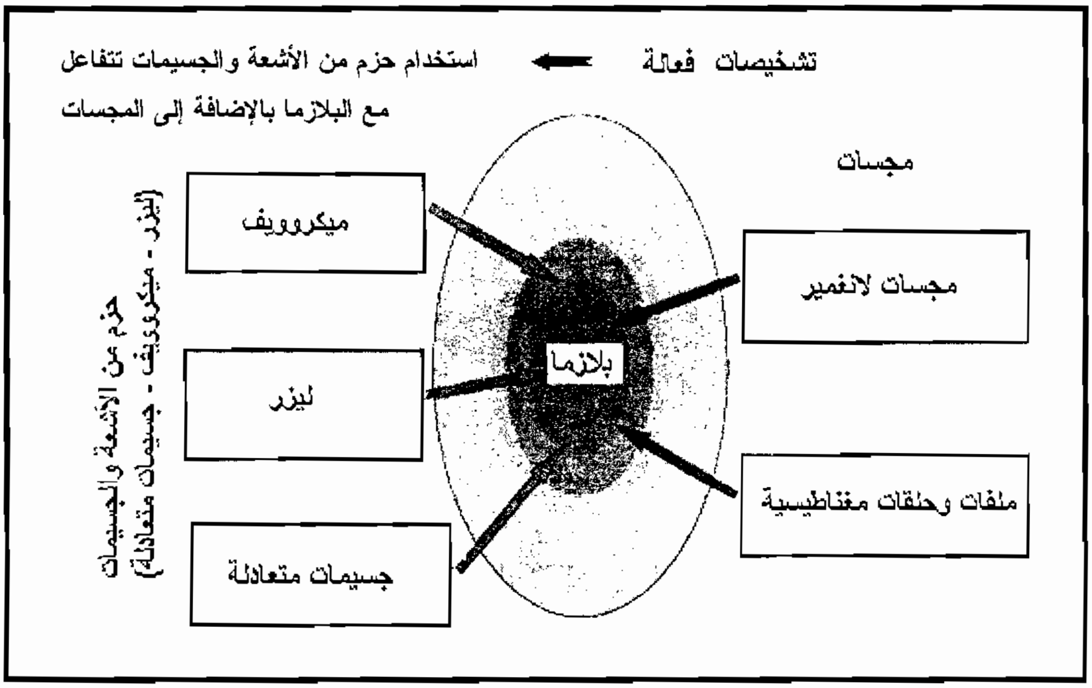
التسخين الذاتي للبلازما

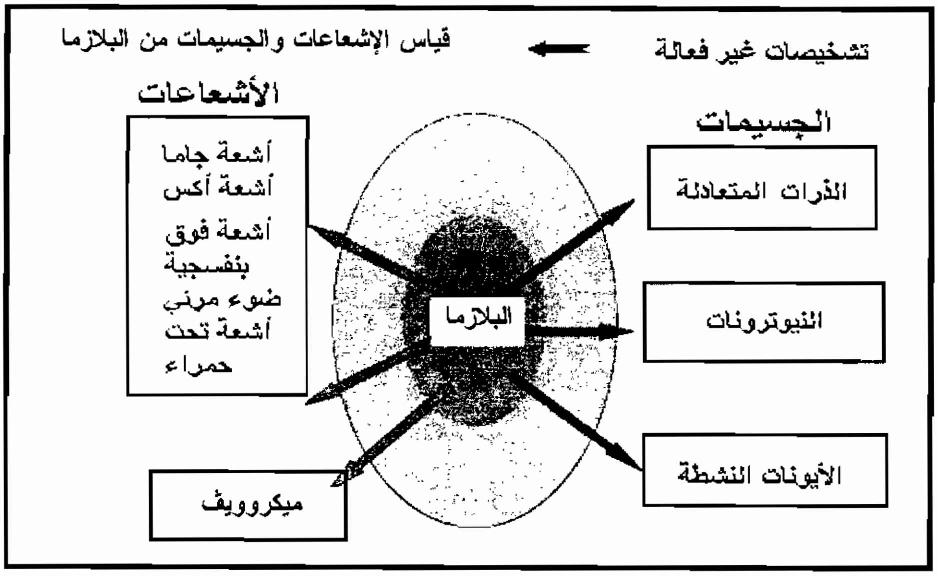
تنتج أيونات الهليوم (أو ما تسمى جزيئات ألفا) عند اندماج الديوتريوم والتريتيوم، وتبقى داخل مصيدة البلازما المغناطيسية لفترة، قبل أن يتم ضخها بعيدًا عن طريق الحارف. وتهرب النيوترونات (المحيادة) من المجال المغناطيسي وأسرها في محطات الطاقة المستقبلية، والتى ستكون مصدرًا للطاقة الأندماجية لإنتاج الكهرباء. عندما تتساوى كل من قدرة الاندماج مع الطاقة المطلوبة لتسخين البلازما والمحافظة عليها، عندئذ تتحقق التعادلية. من ناحية ثانية، تعمل طاقة الاندماج التي تتضمن أيونات الهليوم، فقط، على تسخين أيونات الوقود الديوتريوم والتريتيوم (بالاصطدامات)؛ لكي تحفظ مجريات التفاعل الاندماجي. وعندما تحافظ هذه الآلية على درجة حرارة البلازما المطلوبة لتفاعل الندماجي، عندئذ يصبح التفاعل ذاتيًا (أي ليس هناك حاجة لتسخين البلازما من الخارج)، وهو شرط الإشعال. في البلازما المحصورة مغناطيسيا، يتطلب كون شرط الإشعال لدى التفاعل الاندماجي D-T حوالي ست مرات (في زمن الحصر، أو في كثافة البلازما) من شرط التعادل.

قياس البلازما

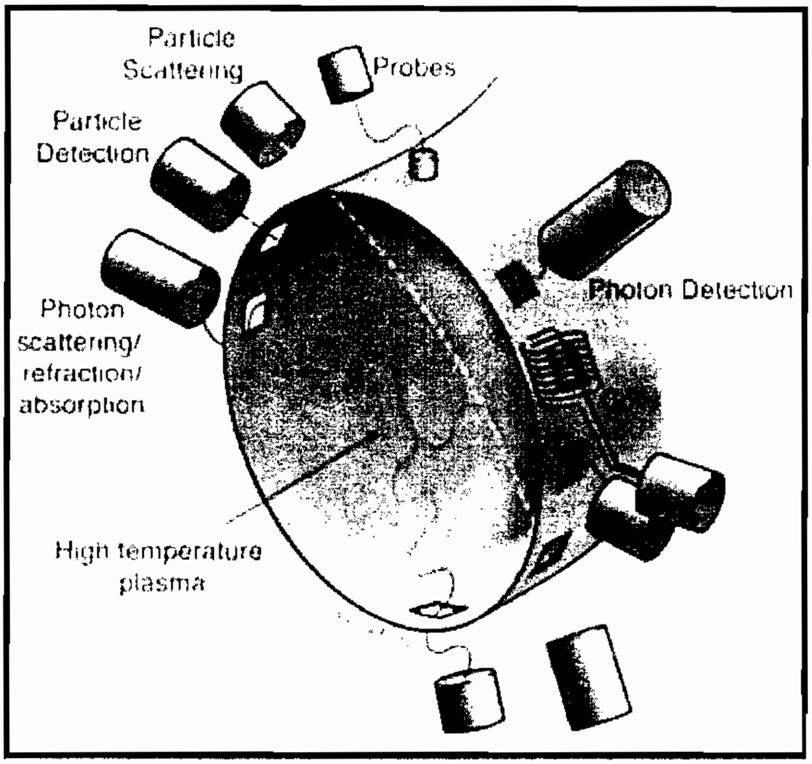
قياس الخصائص الرئيسية البلازما هي واحدة من أصعب جوانب بحوث الاندماج. معرفة بارامترات البلازما المهمة (درجة الحرارة والكثافة والفقد الإشعاعي، وغيرها) مهم جدًا في زيادة فهم سلوك البلازما. ويمكن تصنيف تقنيات القياس الى فعالة أو غير فعالة (انظر الشكل ١٥).. في تشخيصات البلازما الفعالة، يتم جس البلازما (عبر أشعة الليزر، والموجات الدقيقة، والمجسات ..إلخ). على سبيل المثال، في مقياس التداخل (inteferometers)، يتم مرور أشعة الميكروويف خلال البلازما، ويحدث تباطؤ للأشعة بمرورها في البلازما (مقارنة بمرورها عبر الفراغ). ومن هذه التقنية، يمكن قياس معامل

انكسار البلازما، التي تمكننا من معرفـــة كثافـــة الأيونـــات / الإلكترونـــات الموجودة في البلازما. مع استخدام جميع التشخيصات الفاعلة، يجب التأكد من أن آلية الجس لا تؤثر بشكل كبير على سلوك البلازما (انظر الشكل ١٥). مع التشخيص غير الفاعل للبلازما، يتم قياس الإشعاع والجسيمات المنبعثة مــن البلازما، وتستخدم هذه المعرفة لاستنتاج معرفة سلوك البلازمـــا فـــي ظـــل ظروف معينة. على سبيل المثال، من خلال عملية التفاعل النـــدماجي D-T، كواشف النيوترونات على متن التوكاماك، تقيس تدفق النيوترونات المنبعثـــة من البلازما. جميع الأطوال الموجية للموجات المشعة (مرئية، والأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية وغيرها) أيضا. في كثير من الأحيان، تقاس مــن مواقع عديدة في البلازما. وبالتالي يمكن المعرفة التفصيلية عن العملية، التي خلقت الموجات، ومن ثم يتم استنتاج برامتر البلازما الرئيسي.





شكل (١٥)



شكل (١٦): بعض تقنيات المستخدمة لقياس خصائص البلازما.

استيللاريتور stellarator

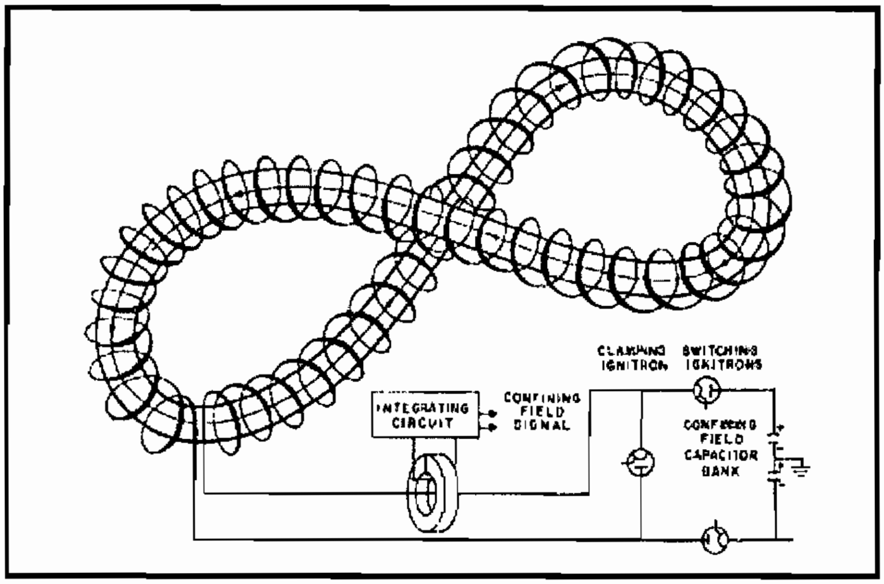
اقترح سبيتزر في عام ١٩٥١ استيللاريتور stellarator كجهاز لحصر البلازما حصرًا مغناطيسيًّا، ومنذ ذلك الوقت، تم بناء سلسلة من الأجهزة وتشغيلها في جامعة برينستون لإجراء البحوث التجريبية في مثل هذه الأنظمة.

ويتم حصر البلازما في جهاز استيللاريتور فقط باستخدام المجالات المغناطيسية المنتجة خارجيًّا. ويعطى التكوين المغناطيسي في الوعاء مع التحول الدوراني لهندسة حصر البلازما، ذات مرتبة أعلى من تلك، التي تكون في الجهاز الحلقي البسيط. وهو يفعل ذلك بحكم توافر المسار، على طول خطوط القوة المغناطيسية، التي يمكن بسهولة تدفق التيارات؛ لتحييد تراكم الشحنات التي تنتجها انجرافات الجسيمات في المجال الحلقي العام. وقد استخدمت طريقتان لإعطاء التحويل الدوراني إلى الأجهزة برينستون. الأول، هو موضح في الشكل (١٧-أ)، ويشوه الوعاء في شكل "الرقم ثمانية"، في حين أن الثانية تستخدم تيارات، تسري في موصلات حلزونية مساعدة على سطح أنبوب حلقي منتظم. في كل الحالتين، يزود المجال المحوري بالتيار الساري في الملفات النحاسية المحاطة بالأنبوب.

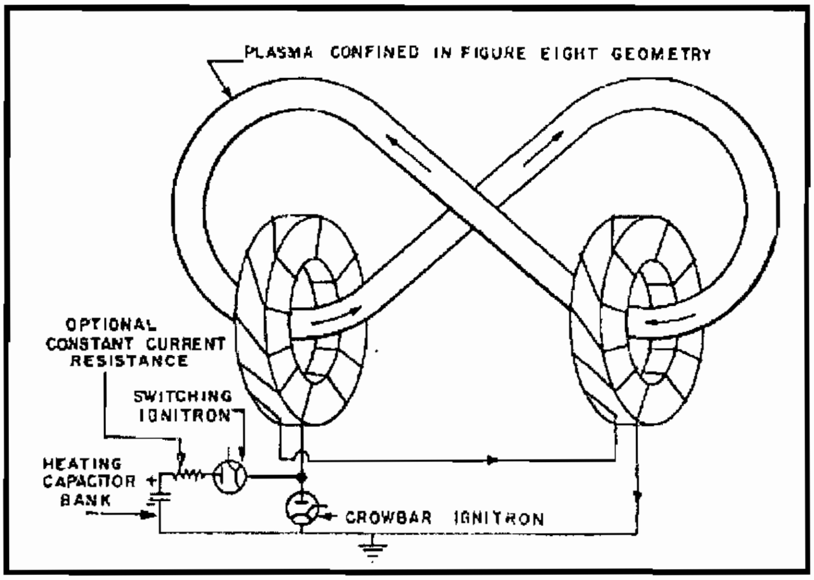
يتم إنجاز التأين والتسخين الأولي للبلازما المحصورة في جهاز استيللاريتور، عن طريق أنبوب مغلق من البلازما، تعمل كملف ثانوي لمحول خارجي، كما هو مبين في الشكل (١٧-ب). تنتج تغيرات الفيض في المحول الحديدي مجال كهربي محوري في البلازما، الذي يعجل الإلكترونات، وبقدر أقل بكثير لدى الأيونات. وبالتالي، تكون الطاقة المعطاة إلى جزيئات الغاز عشوائية واستخدامها في انجاز التأين للغاز، وينتج عن ذلك "تسخين" البلازما.

استيللاريتور هو أيضًا طريقة مشابهة لبناء المفاعلات اللاندماجية، غير أنها تمتلك ميزة أن تقليل الخسائر الناتجة عن التداخلات لا يكون عن طريق تيار كهربائي، يضخ في البلازما، بل عن طريق بناء وشكل هندسي أكثر تعقيدًا للمغناطيسات، التي تولد الحقل المغنطيسي.

ويشترك كلا المفاعلين في ميزة أنهما أكثر أمنًا من المفاعلات التقليدية الانشطارية؛ بسبب أن التفاعل النووي ينقطع بمجرد ملامسة البلازما لحوائك المفاعل، كما أن النفايات الناتجة أقل إشعاعًا من تلك، التي تنتج عن مفاعلات كلاسيكية.



شكل (١٧-أ): تشويه الوعاء هندسيًّا بحيث يأخذ الرقم ثمانية، والدوائر المبسطة لمجال الحصر.

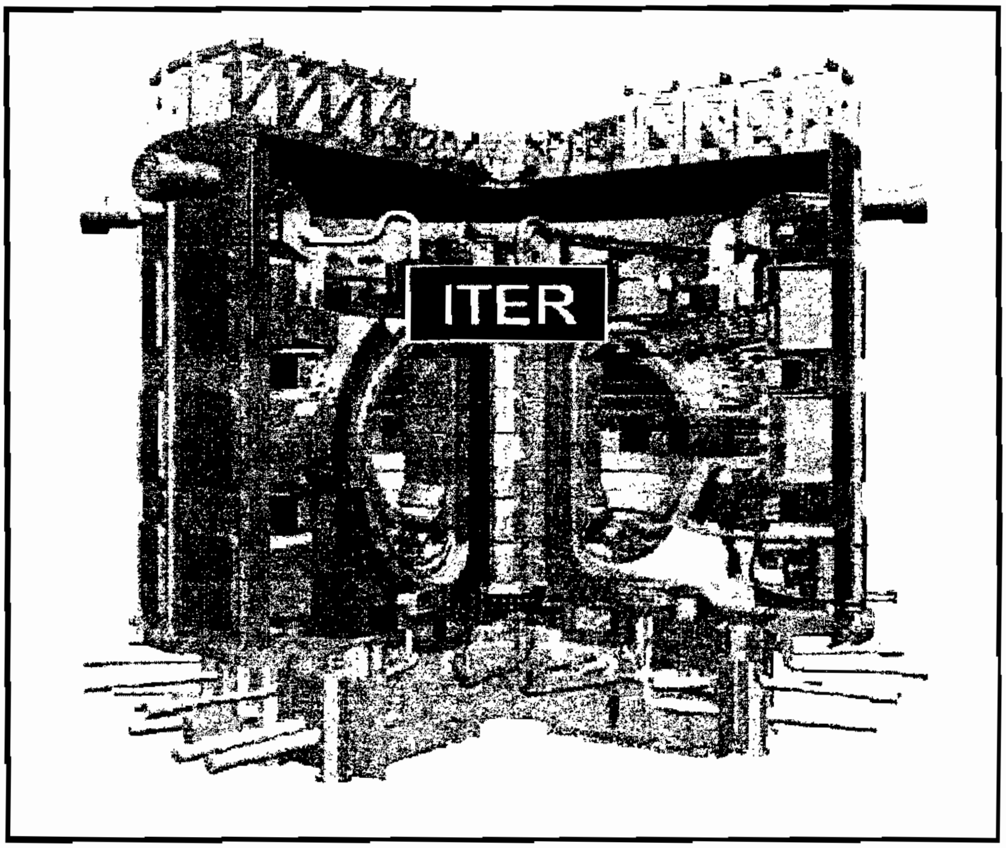


شكل (١٧-ب): جهاز التسخين الأومي والدوائر المبسطة لهذا الغرض.

الأيتر ITER (المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي)

زادت التحديات البيئية في قريتنا الكونية الصغيرة، فعاش العالم، في الصيف الماضي، معاناة تغيراتها، بحرائق هائلة في روسيا، وبفيضانات شديدة في الصين والباكستان؛ فقد أدى سوء استخدام الطاقة إلى ارتفاع درجة الحرارة على سطح الكرة الأرضية، والذوبان السريع لجليد قمم الجبال، ليؤدي لحرائق

شاسعة في منطقة، وفيضانات غزيرة في مناطق أخرى من العالم. وتحتاج معالجة هذه التحديات لجهود إقليمية وعالمية مشتركة، ولن تستطيع أي حكومة معالجتها بجهود فردية، وبدأت تتفهم دول العالم هذه الحقيقة، وتعاونت للعمل في مشروع دولي؛ لبناء مفاعل الاندماج النووي لنقل اقتصاد العالم لاقتصاد هيدروجيني، بإنتاج كميات هائلة من الطاقة النظيفة من مياه البحر، بالاستفادة من ذرات الهيدروجين المكونة للماء.



شكل (١٨) الأيتر

المشاركون في هذا المشروع، هم: الاتحاد الأوربي، والولايات المتحدة، واليابان، وروسيا، والصين، وكوريا الجنوبية، والهند. وترجع فكرة هذا المشروع إلى عام ١٩٨٥، حينما قررت الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي وبالتعاون مع الاتحاد الأوربي واليابان؛ للعمل في مشروع اندماج نووي لإنتاج الطاقة النووية، لتقر نماذجه الهندسية في عام ٢٠٠١، وتوافق على بناء مفاعله في عام ٢٠٠٥، وتعتمد خطته التنفيذية في عام ٢٠٠٧. وعين مجلس

المشروع، أوسامو موتوجيما، المدير العام السابق للمركز الوطني الياباني لعلوم الاندماج النووي، مديرًا عامًّا لتنفيذه، كما وفرت اليابان ٢٠% من خبرائه. يوضح الشكل (٨) حجم المفاعل، قياسًا على صورة الرجل الموجودة أسفل الشكل.

والجدير بالذكر أن التجارب العلمية للاندماج النووي بدأت في عام ١٩٣٢، وطورت أبحاثها العسكرية في الأربعينيات، كما تمت تجربة الانفجار النووي للقنبلة الهيدروجينية في عام ١٩٥٢، وأجريت أبحاث التحكم في الاندماج النووي لإنتاج الطاقة في الخمسينيات.

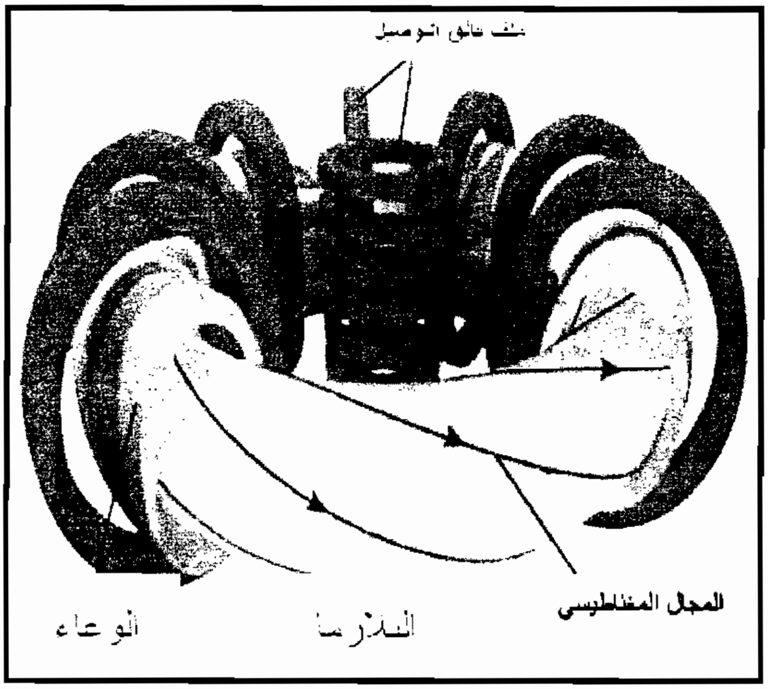
وتعتمد فكرة هذا المشروع على آلية إنتاج الطاقة في الشمس من اندماج النظائر المشعة للهيدروجين؛ إذ يقوم مفاعل الاندماج النووي في مرحلته الأولى على إنتاج نظائر الهيدروجين المشعة، بدمج ذرتين من الهيدروجين لتكوين الديوتريوم، أو ثلاث ذرات من الهيدروجين لتكوين التريتوم. وسيقوم في مرحلته الثانية بدمج النيوتريوم والتريتيوم لتكوين غاز الهليوم، وسيترافق ذلك مع إنتاج كمية هائلة من الطاقة. وتنحصر صعوبة عملية الاندماج النووي في تحويل النظائر المشعة للهيدروجين، الديوتريوم والترتيوم، إلى البلازما.

والبلازما هى غاز أيوني، مكونة ذراته من إلكترونات وبرتونات غير متساوية، ويحتاج حصره والتحكم فيه إلى درجة حرارة عالية جدًّا، تقدر بمائة مليون درجة مئوية. ومن المقرر أن يقوم المفاعل بإنتاج البلازما في عام ٢٠١٩، وسيبدأ بعملية الاندماج النووي للديوتريوم والتريتيوم في عام ٢٠٢٧. ويكلف بناؤها المفاعل تريليون ين ياباني، وسيغطي الاتحاد الأوربي ٤٥,٤% من الكلفة، وستغطي كل من بقية الدول الست ٩,١% من الكلفة. وسيبنى المفاعل في فرنسا، وسيكون قطره أو ارتفاعه ٣٠ مترا، وستطور الدول المشاركة أجزاءه المختلفة، وتنقلها إلى موقع المشروع. وسيبدأ المفاعل في إنتاج الطاقة الكهربائية من مياه البحر في عام ٢٠٢٥.

ويعتبر مشروع الاندماج النووي الجديد خطوة مهمة في إمكانة الاستفادة من التحكم في الطاقة الناتجة من الاندماج النووي؛ لتطوير تكنولوجية تنتج الطاقة الكهربائية النظيفة. وهذا المشروع أصبح تحت رعاية الوكالة الدولية للطاقة الذرية؛ حيث توفر الوكالة الدعم الكامل للمشروع، مثل: تنظيم المؤتمرات الدولية لطاقة الاندماج، مرة كل عامين، وكذلك الاجتماعات الفنية مع خبراء

من مشروع الأيتر، وإصدار الوثائق والرسائل الأخبارية من المشروع. وتقوم فكرة هذا الجهاز على مفهوم التوكاماك (شكل ٩)؛ حيث يتم تسخين الوقود الى أكثر من مائة مليون درجة؛ حيث تتحقق عملية الاندماج النووي لالتحام أكثر من نواة نووية (الديوتريوم والتريتيوم)، لتكوين نواة أثقل (الهليوم)، بالإضافة إلى النيوترونات، التي تنقل معظم الطاقة الناتجة من التفاعل إلى جدار الوعاء. ونظرًا لوجود طبقة رقيقة من الليثيوم، يتم إنتاج التريتيوم نتيجة تفاعل النيوترونات مع الليثيوم، ويمكن التخلص من الحرارة الناتجة من إبطاء حركة النيوترونات بمائع التبريد. لتحقيق معدل طاقة ناتجة من المفاعل أكثر من الطاقة اللازمة لإحداث هذا التفاعل، فإنه يتطلب بلازما كثيفة، وذات درجة حرارة عالية بالإضافة إلى احتوائها لفترة زمنية طويلة. ولكي يتحقق ذلك، لابد ان يكون حجم مفاعل الأيتر ضعف حجم أكبر مفاعل، وهو الجيت JET الموجود حاليًا في المملكة المتحدة.

أما عن منظمة المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، فإنها المسؤلة عن تنفيذ المشروع ومقرها مدينة كاداراش جنوب فرنسا، وهي أيضًا المسؤلة عن كافة أعمال المشروع، مثل: الحصول على التراخيص، وشراء المعدات وتجارب التشغيل الفعلي للمشروع. وتتحمل الدول الأعضاء في المنظمة تكلفة المشروع، حيث تقدر بحوالي خمسة بلايين يورو، موزعة على عشرة سنوات. تم الانتهاء من معظم الأعمال التصميمية للمشروع في عام ٢٠٠١. إن مشروع الأيتر ليس غاية في حد ذاته، وإنما هو جسر تجاه المحطة الأولى، التي توضح إمكانية إنتاج الطاقة الكهربية على نطاق واسع.



شكل (١٩): المبدأ الذي يعمل بموجبة مفاعل الأيتر.

الفرق بين الانشطار النووي والاندماج النووي

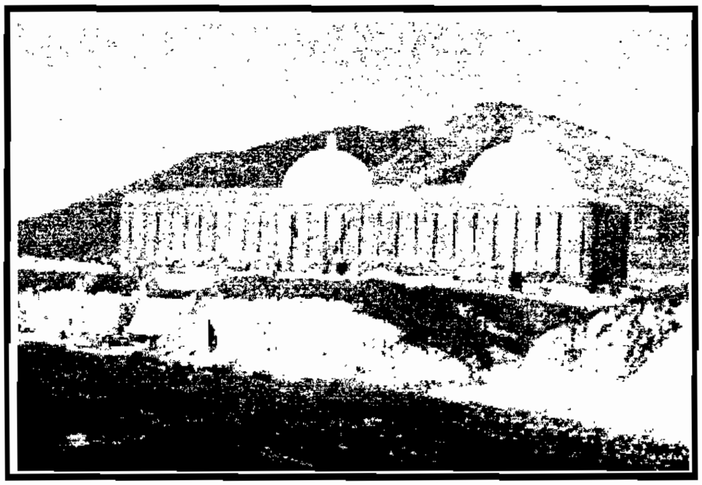
تم اكتشاف الانشطار النووي في ديسمبر ١٩٣٨؛ أي بعد حوالي ٤٢ عامًا من اكتشاف النشاط الإشعاعي، عندما حاول العلماء استحداث نظير لعنصر اليورانيوم ٢٣٥، ذي العدد الذرى ٩٢، والذي تحتوي نواته على ١٤٣ نيوترون، بإضافة نيوترون جديد إلى نواته ليصبح يورانيوم ٢٣٦. وهذا النظير غير مستقر؛ فيتفتت إلى وحدات صغيرة لعناصر جديدة، ويكون مصاحبًا لانبعاث طاقة حرارية هائلة؛ نتيجة نقص في مجموع كتل الوحدات الصغيرة بعد التفاعل، عن تلك الكتلة الداخلة قبل التفاعل. وبتطبيق علاقة آينشتين، قدرت الطاقة الحرارية المتولدة من انشطار نواة اليورانيوم ٢٣٦ بحوالي ٢٠ مليون ضعف الطاقة الحرارية، المتولدة من اشتعال جزئ واحد من مادة الديناميت. ونظرًا لخروج عدد ٣ نيوترونات، بالإضافة إلي عنصر السترنشيوم والزينون s، فإن هذا الانشطار يمكن أن يستمر؛ بحيث تتكرر هذه العملية مع نويات يورانيوم أخرى، فيما يسمى بالتفاعل المتسلسل.

تعتبر مصادر الطاقة النووية من أهم المصادر الرئيسية في العالم اليوم؛ بسبب كمية الطاقة الهائلة، التي يمكن أن نحصل عليها من الوقود النووي القليل الذي

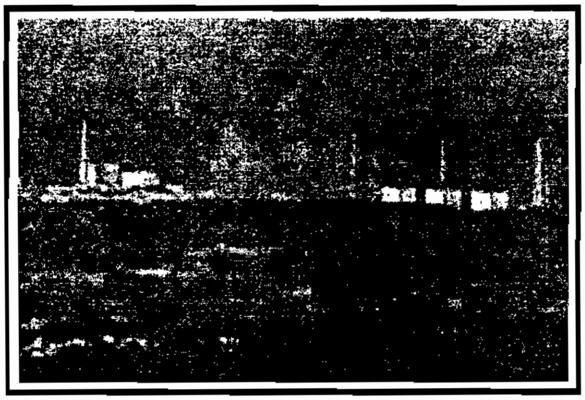
يستهلك. إلا أن الخطر الذي يرافق إنتاج مثل هذه الطاقة وإجراءات السلامة، التي لا يستطيع كثير من الدول توفيرها؛ أدى إلى التقليل من انتشار استخدام مثل هذه الطاقة. ومن أهم المخاطر التي تنتج من حوادث الانشطار النووي هو التسرب النووي، الذي حدث من المفاعل النووي (تشيرنوبل) في روسيا عام ١٩٨٥م، والذي خلف تلوثًا للبيئة بالإشعاعات النووية، ونتج عن ذلك إصابة كثيرين من السكان بأمراض مختلفة. أيضًا بعد الزلزال القوي الذي ضرب الساحل الشرقي لليابان يوم ١١ مارس ٢٠١١، قد أفاد بأن مفاعلات محطة فوكوشيما النووية، كانت في حالة سيئة بسبب شدة الزلزال، والمشاكلات مع أنظمة التبريد لوحظ تسرب اشعاعي. يوضح الشكل (١١) انفجار في إحدى المحطات النووية، ونتج عنه تسرب إشعاعي.

والتفاعل النووي الذي يحدث في مثل هذه الحالة، هو الانشطار النووي؛ حيث تقذف ذرات العنصر المستخدم كوقود نووي مثل نظير اليورانيوم بقذائف من النيوترونات؛ فتنشطر النواة إلى نواتين أو أكثر، ويرافق هذا الانشطار انبعاث قدر كبير من الطاقة وعدد من النيوترونات الحرة. وتصطدم هذه النيوترونات التي تتحرر بذرات اخرى من ذرات الوقود النووي، فتنشطر هي الأخرى فيستمر التفاعل (الانشطار) وبشكل متزايد؛ ولهذا يسمى مثل هذا التفاعل بالتفاعل المتسلسل، وتجعل عملية التسلسل في التفاعل مقدار الطاقة الناتجة عن التفاعل يصل إلى حد لا يمكن السيطرة عليه؛ مما يؤدي إلى انفجار المفاعل النووي، وهذا ما يحدث في القنبلة النووية. أما في المفاعلات النووية المستخدمة لتوليد الكهرباء أو تحريك السفن الضخمة أو غيرها (شكل ١٠)، فانه لا بد أن يحتوي المفاعل النووي على وسائل للسيطرة على سرعة التفاعل؛ لجعل الانشطار يحدث بمعدل ثابت، عندما يصل مقدار الطاقة إلى حد معين، والوسيلة - في الغالب - هى امتصاص جزء من النيوترونات الناتجة من الانشطار، ومنعها من الاصطدام بذرات اليورانيوم، وبذلك نجعل عملية الانشطار تحدث بصورة منتظمة وليست متزايدة. ومن أجل امتصاص النيوترونات، تستخدم عدة طرق، من أهمها: وضع قضبان ماصة للنيوترونات من مواد مناسبة مثل الكادميوم، وتتحرك هذه القضبان تلقائيًا إلى داخل المفاعل النووي، بمجرد وصول درجة الحرارة داخله إلى حد معين، وتقوم بامتصاص كمية من النيوترونات؛ مما يؤدي إلى توقف نمو التفاعل، وأن الطاقة الناتجة يمكن حسابها بمقارنة طاقة الربط النووية للنواة قبل انشطارها، ومجموع طاقة الربط النووية للنواتين الناتجتين؛ حيث نلاحظ أن هناك فرقًا بين الطاقتين، وهو

الطاقة التي نحصل عليها من عملية الانشطار، أو بمعنى آخر أن الطاقة لكل نيوكلون في النواة الثقيلة هي أكبر كثيرًا من الطاقة، لكل نيكلون في النواة الخفيفة. توفر محطات الطاقة النووية ١٧٪ من إنتاج الكهرباء في العالم، وتقدر بنسبة ٧٥٪ من الكهرباء في فرنسا. يمكن أن ينتج واحد باوند من اليورانيوم (حجم كرة البيسبول) طاقة، تقدر بأكثر من مليون غالون من البنزين.



شكل (٢٠): محطة نووية لتوليد الطاقة.

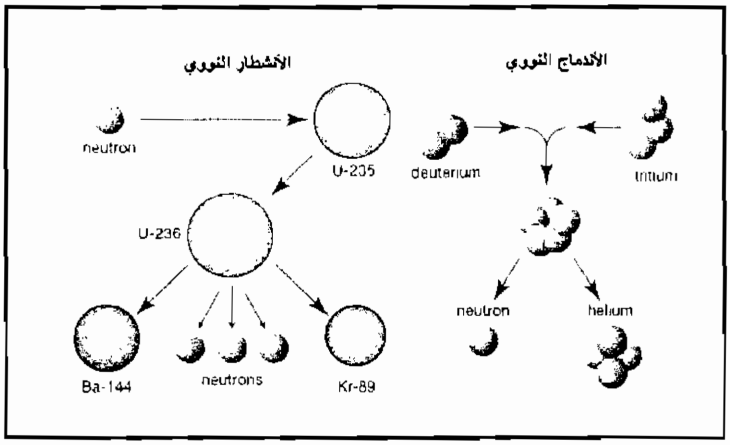


شكل (٢١): انفجار في محطة نووية في اليابان.

القنبلة النيتروجينية هي أحد تطبيقات الاندماج أو الانصهار النووي الاندماج النووي عملية معاكسة للانشطار النووي، تمامًا حيث إنه في عملية الاندماج النووي، تتحد نواتان خفيفتان؛ لتكونا نواة جديدة، إلا أن عملية الاندماج ليست ممكنة في جميع العناصر؛ حيث تحدث في العناصر التي يكون فيها مجموع

طاقة الربط للنواتين، قبل الاندماج أكبر من طاقة الربط للنواة. الناتجة من الاندماج، فيتم بذلك الاستفادة من الفرق في الطاقة.

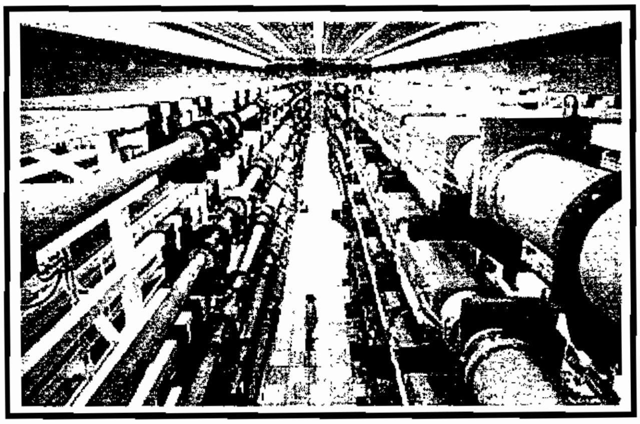
ويعتبر الاندماج النووي أقل خطرًا من الانشطار النووي؛ بسبب عدم وجود إشعاعات نووية في هذا التفاعل، إلا أن إرادة الله، عز وجل، جعلت الاندماج النووي أكثر صعوبة؛ حيث تعمل الشحنة التي تحملها كل نواة على منع الاندماج عكس ما يحدث في الانشطار. ومن أجل حدوث الاندماج النووي، لابد من توفر طاقة كبيرة؛ من اجل التغلب على قوة التنافر الكهربائي بين النواتين وتقريبهما من بعضهما؛ ليتاح لقوى الترابط النووية أن تعمل. وهذه الطاقة اللازمة لبدء التفاعل، لا يمكن الحصول عليها بطريقة تقليدية؛ حيث تقدر بمائة مليون درجة مئوية؛ ولذلك يستعان بالتفاعل الانشطاري؛ لكي يحدث التفاعل الاندماجي كما في القنبلة الهيدروجينية؛ حيث يوضع بها قنبلة صغيرة انشطارية تكفي الطاقة الناتجة عنها لحدوث تفاعل اندماجي، بين ذرات نظير الهيدروجين، والتي هي من مكونات القنبلة الهيدروجينية، وللمعلومية، فإن الطاقة الناتجة عن اندماج نواتين هي أكبر كثيرًا من الطاقة اللازمة؛ لإحداث هذا الاندماج. وحتى الوقت الحاضر، لا توجد استفادة من التفاعل الاندماجي لأغراض سلمية للسبب الذي ذكرناه، إلا أن الأبحاث تجري بشكل جاد في إيجاد سبل مناسبة لإنتاج الطاقة والتحكم بها، بواسطة التفاعل الاندماجي، وهذا النوع من التفاعل هو الذي يمد سطح الأرض بما تحتاج إليه من طاقة؛ حيث يحدث مثل هذا التفاعل على سطح الشمس، بين نظير ذرات الهيدروجين (الديتيريوم).



شكل (٢٢): الفرق بين الانشطار النووي والاندماج النووي.

الاندماج بحصر القصور الذاتي

الاندماج بحصر القصور الذاتي، هو عملية تحفيز لتفاعلات الاندماج النووي بتسخين وانضغاط هدف الوقود، الذي يتكون من كبسولات صغيرة غالبًا، تحتوي على خليط من الديوتيريوم والتريتيوم. لتسخين وانضغاط الطبقة الخارجية لهدف الوقود، توجه الطاقة من الخارج، عن طريق استخدام حزم من الليزر الضوئي أو إلكترونات أو أيونات ذوي طاقة عالية. تستخدم معظم أجهزة الحصر بالقصور الذاتي أنظمة الليزر (شكل ١٣). عند تسخين الطبقة الخارجية لمادة الهدف، فإنها تنفجر إلى الخارج؛ مما يؤدي إلى حدوث قوة تفاعل ضد ماتبقى من الهدف وتعجيله للداخل، وترسل أمواجًا تصادمية داخل المركز. هذه الأمواج التصادمية الناشئة من الخارج إلى الداخل، تسبب انضغاط وتسخين الوقود عند المركز، فتتيح فرصة سير التفاعل. ومن المفروض ان تلك الطاقة الناتجة، من تلك التصادمات، سوف ترفع من درجة حرارة الوقود النووي المحيط، وتؤدي إلى التفاعل الاندماجي. والهدف من الاندماج بالقصور الذاتي، هو إنتاج الحالة المسماة "الإشعال"؛ حيث تتسبب عملية التسخين في سلسلة تفاعلات، تعمل على أحتراق جزء من الوقود. وتبلغ كريات الوقود حجم سن القلم، ويحتوي على ١٠ ملليجرامات من الوقود، وفي الواقع يتفاعل جزء صغير من الوقود، ويؤدي إلى حدوث الاندماج. وفي حالة اندماج مادة الهدف كاملة، فإن الطاقة الناتجة سوف تعادل الطاقة الصادرة من حرق برميل من النفط.



شكل (٢٣): ليزر ضخم يستخدم في اندماج القصور الذاتي، وهو يتكون من ١٠ أشعة

طريقة القصور الذاتي

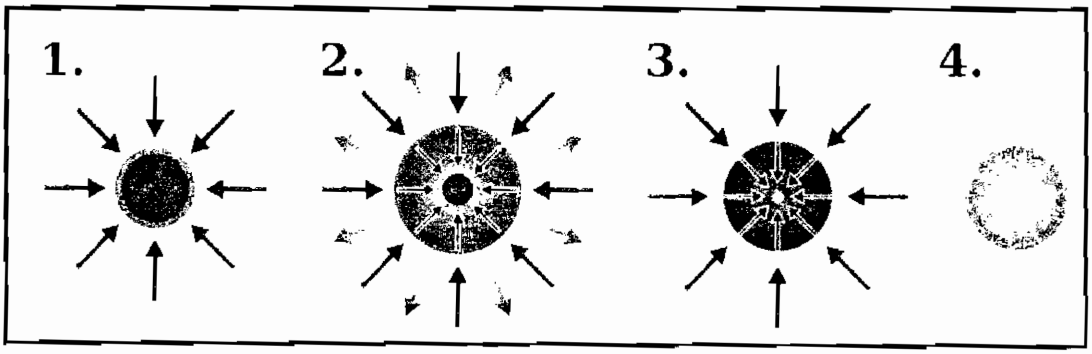
يوضح شكل (١٩) المراحل الانتقالية لتحقيق تفاعل الاندماج النووي بالقصور الذاتي لكبسولة من الوقود، تحتوي على مخلوط من الديوتيريوم والتريتيوم، عن طريق تصويب عدد كبير من أشعة الليزر عالية الطاقة. تمثل الأسهم الزرقاء عمليات الأشعة المتجهة إلى الداخل، والأسهم البرتقالية العمليات المتجهة إلى الخارج، وتمثل الأسهم البنفسجية الطاقة الحرارية الضاغطة المتجهة إلى الداخل ومراحل إشعال الاندماج النووي بطريقة القصور الذاتي:

١. يقوم شعاع الليزر بتسخين سطح الهدف لإنتاج بلازما.

٢. تتأثر مادة الوقود وتنضغط إلى الداخل بالأمواج التصادمية.

٣. تصل مادة الوقود في الكبسولة إلى المرحلة الحرجة، التي تفي بشرط لاوسون (كثافة قلب الوقود ٢٠ ضعف كثافة الرصاص ودرجة حرارة الأشعال ١٠٠ مليون درجة مئوية).

٤. يبدأ تفاعل الاندماج النووي الحراري بسرعة، خلال الوقود المضغوط، وتنطلق طاقة أكبر من الطاقة المستخدمة.



شكل (٢٤): رسم تخطيطي لمراحل الأندماج بالقصور الذاتي بأستخدام الليزر.

تشخيصات بلازما التوكاماك

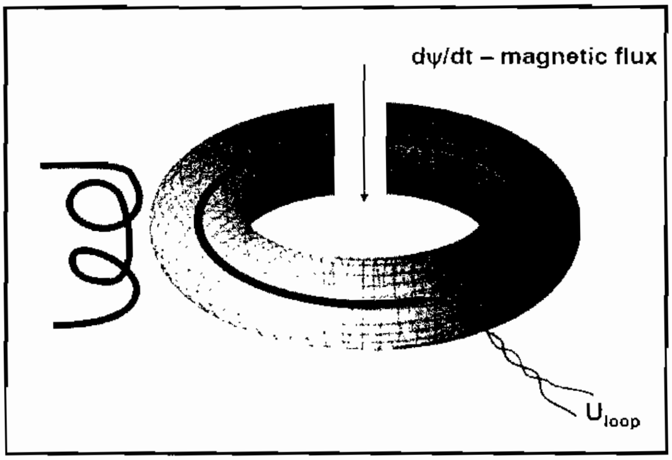
لا يجد المهندس والتجريبيون المشتغلون بالغازات العادية صعوبة في تحديد الخواص الفيزيقية لحالة الغاز. ويمكن قياس درجة الحرارة للغاز باستخدام الترمومتر أو البيرومتر، وكذلك يمكن قياس ضغط الغاز باستخدام البارومتر، ويمكن قياس سرعة تدفق الغاز باستخدام مقياس التدفق، بالإضافة إلي الطرق الفيزيقية والفيزوكيميائية المتطورة؛ لتحديد المكونات الكيميائية. أما البلازما، فإنمها تمثل موقفاً مختلفاً عن الغازات العادية؛ حيث يوجد عديد من الحالات لقياس درجة الحرارة بطرق مختلفة لنفس نوع البلازما؛ مما يؤدى إلى نتائج

مختلفة مع بعضها. طرق تحديد درجة الحرارة والكثافة ومكونات البلازما هي من أهم البارامترات في فيزياء البلازما التجريبية، وهي تسمى تشخيصات. ويمكن تشبيه تشخيص الغاز العادي بتشخيص الطبيب البشرى لمريض وتشخيص البلازما بتشخيص الطبيب البيطري للحيوان.

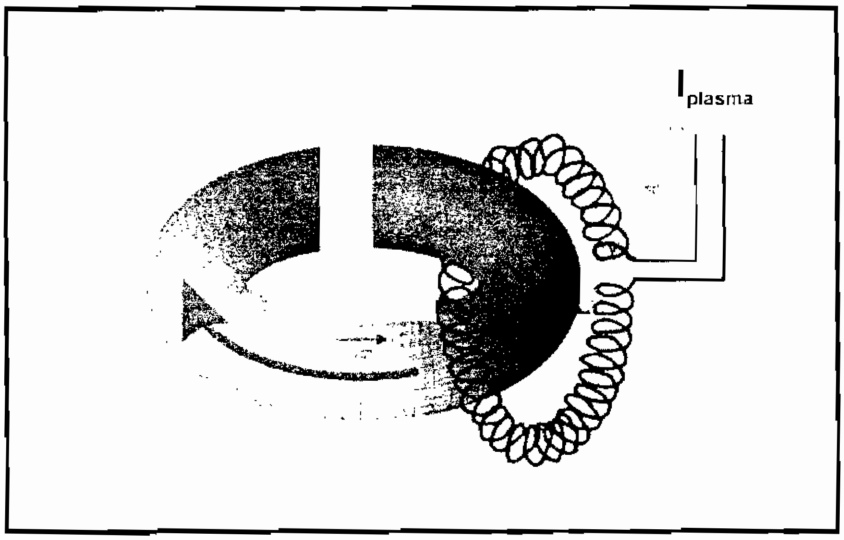
يعتبر قياس كميات البلازما مهمة صعبة؛ لأنها ليست مثل أي مادة عادية. ويحقق قياس كميات البلازما بأستخدام المجسات الكهروستاتيكية تفاعلاً مع البلازما، ويسبب إضطرابًا للكمية المقاسة. استخدام هذه الطرق في البلازما الساخنة غير ملائم؛ لأنها تؤدي إلى تعطيل التفريغ. هناك طرق أخرى لتشخيص البلازما الساخنة، هي قياس الإشعاعات المنبعثة في المنطقة تحت الحمراء والميكرونية، وكذلك تفاعل موجات الأشعة تحت الحمراء والميكرونية مع البلازما. يحقق قياس الخصائص البصرية (مثل معامل الانكسار) أيضًا معلومات عن البلازما. يمكن قياس خصائص البلازما بطرق دقيقة وموثوق بها، باستخدام الأشعة تحت الحمراء والميكرونية. بارامترات البلازما الرئيسية، مثل: كثافة ودرجة حرارة الإلكترونات. قياس التقلبات في كثافة ودرجة الحرارة الإلكترونات يمكن من تحديد كثافة تيار البلازما بتشخيصات متطورة.

حلقة الجهد

تستخدم حلقة الجهد للحصول على الجهد المستحث في البلازما بين النهايات المفتوحة، باستخدام حلقة ذات لفة واحدة مجاورة لتيار البلازما. وهذا الجهد المستحث في البلازما يتم بواسطة محول التسخين الأومي، في أنظمة التوكاماك.



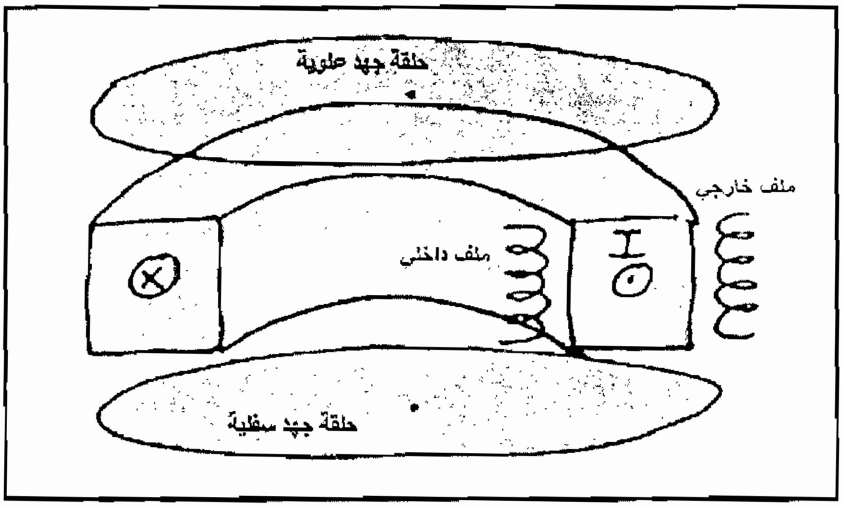
شكل (٢٥): حلقة الجهد.



شكل (٢٦)

مراقبة موضع البلازما

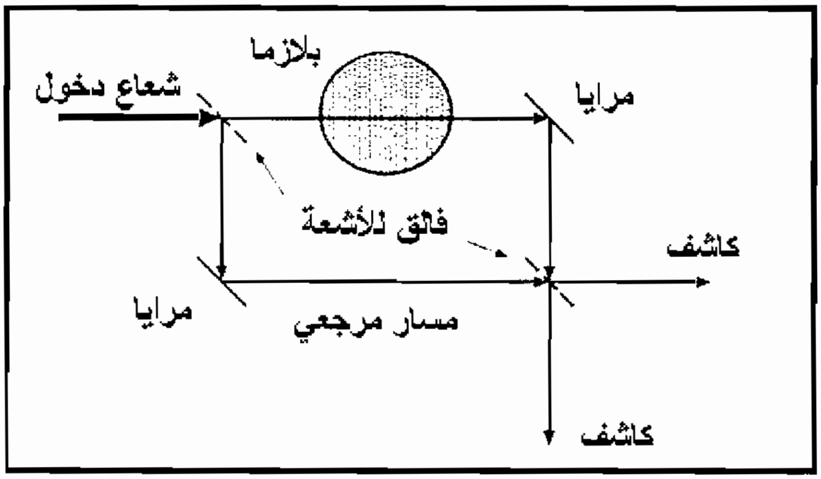
توضع ملفات داخل وخارج البلازما، وحلقات جهد أعلى وأسفل البلازما؛ لرصد موضع البلازما داخل وعاء التفريغ الحلقي والإشارات من تلك الملفات، وتستخدم الحلقات في تحكم التغذية الخلفية لموضع البلازما.



شكل (٢٧)

مقياس التداخل (Interferometry)

يحدث التداخل إذا تم وضع البلازما في ذراع واحدة من التـداخل، ومـن ثـم فإن مرحلة التحول متناسبة مع كثافة البلازما تتكامل على طول الطريق.



شكل (٢٨): مقياس التداخل لماخ-زيندر.

انتشار الموجات في البلازما الباردة - معادلة التشتت

تستند جميع الأشعة تحت الحمراء والميكرونية إلى قياس الاشعة المنبعثة من البلازما وانتشارها داخل البلازما، أو انتشارها بإطلاقها من الخارج؛ خلال البلازما. وهذا يعني أن الخصائص البصرية للبلازما يجب أن تقاس بالتفصيل؛ خصوصا أن معامل الانكسار للبلازما ذات أهمية كبيرة. وهو يخبرنا ما إذا كان سيتم امتصاص الموجات الساقطة، أو انعكاسها في البلازما.

يوصف انتشار الإشـعاع الكهرومغناطيـسي داخـل البلازمـا بمعـادلات ماكسويل

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad ; \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

بعد حذف B نحصل على المعادلة التفاضلية لـ E

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \frac{\partial}{\partial t}\left(\mu_0 \mathbf{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right) = 0$$

ومراعاة مبدأ التطابق يمكننا أن نحلل المعادلة في دوام جزئي، ويعتمد جـزء تردد باستخدام تحويل فورييه للحقل الكهربائية:

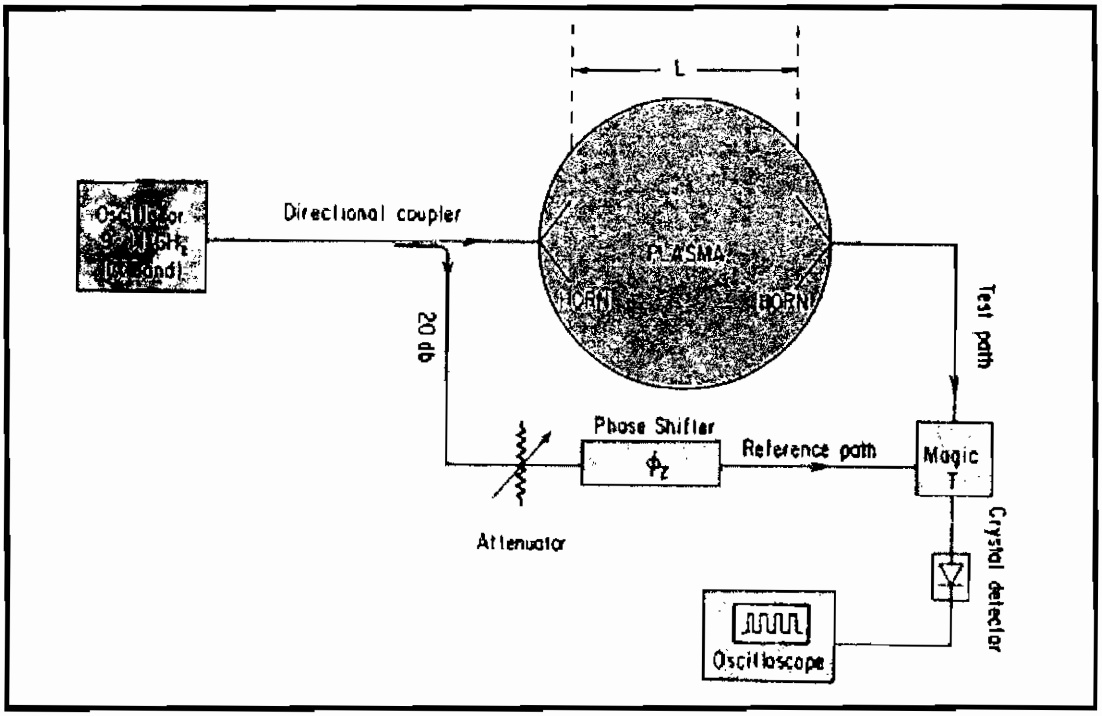
$$\mathbf{E}(x,t) = \int E(\mathbf{k},\omega)\, e^{-i(k\cdot x-\omega t)} d^3\mathbf{k}\, dt.$$

مقياس التداخل

مقياس التداخل الميكروني من أهم الطرق التشخيصية لقياس كثافة الإلكترونات في البلازما، دون اضطراب. مقياس التداخل، المبين بالشكل، هو نسخة من مقياس التداخل لماخ–زيندر Mach-Zehnder. ويتم قياس الكثافة بمقارنة التغير في الطور لموجتين: إحداهما تجتاز البلازما، والأخرى موجة مرجعية تجتاز الفراغ، أو الهواء خارج البلازما. ونتيجة لتغير كثافة البلازما، يتغير طول المسار للأشعة الميكرونية، وبالتالي يحدث تغير في الطور.

الأمواج في البلازما عادة أمواج عادية waves O، لها معامل انكسار، يعطى بالعلاقة:

$$N^2 = 1 - \frac{n}{n_c}$$



شكل (٢٩): مقياس التداخل الميكروني.

تعتمد فقط على الكثافة وليس المجال المغناطيسي.

المجال عند الكاشف الناشئ عن الأشارة المارة خلال ذراع المجس.

$$E_1 = A_1 \cos\left(\omega t + \phi_1 + \phi_{\text{plasma}}\right)$$

حيث:

$$\phi_{\text{plasma}} = \int_0^l (k - k_0)dx\,,\; k_0 = \frac{\omega}{c},\; k = \mu\frac{\omega}{c}.$$

المجال عند الكاشف الناشئ عن الإشارة المارة خلال ذراع الإسناد:

$$E_2 = A_2 \cos\left(\omega t + \phi_2\right).$$

مخرج الكاشف:

$$\begin{aligned} V &= \left(E_1 + E_2\right)^2 \\ &= A_1^2 \cos^2\left(\omega t + \phi_1 + \phi_{\text{plasma}}\right) + 2A_1A_2 \cos\left(\omega t + \phi_1 + \phi_{\text{plasma}}\right)\cos\left(\omega t + \phi_2\right) \\ &\quad + A_2^2 \cos^2\left(\omega t + \phi_2\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{A_1^2 + A_1^2 \cos 2\left(\omega t + \phi_1 + \phi_{\text{plasma}}\right)}{2} \\ &\quad + A_1A_2 \cos\left(2\omega t + \phi_1 + \phi_{\text{plasma}} + \phi_2\right) + A_1A_2 \cos\left(\phi_1 + \phi_{\text{plasma}} - \phi_2\right) \\ &\quad + \frac{A_2^2 + A_2^2 \cos 2\left(\omega t + \phi_2\right)}{2} \end{aligned}$$

$$V = \frac{A_1^2}{2} + A_1A_2 \cos\left(\phi_1 + \phi_{\text{plasma}} - \phi_2\right) + \frac{A_2^2}{2}.$$

القبص ذات المجال المنقلب
Reversed field pinch (RFP)

تأثير القبص هو ظاهرة خاصة بحفظ البلازما، بعيدة عن جدران الوعاء الحاوي للبلازما، باستخدام المجال المغناطيسي. وتؤدي هذه الظاهرة إلى زيادة كثافة البلازما وتسخينها من خلال الانضغاط الأدياباتيكي في غضون ذلك البلازما، تسخن بتأثير جول. في عام ١٩٥١، قام العالمان كوسين ووار Cousins and Ware بحصر البلازما، داخل وعاء حلقي صغير، ولاحظوا أن عمود البلازما غير مستقر. وسرعان مايتحطم نتيجة اللاستقرارية التي تنمو سريعا. ولكي يتم التغلب على اللاستقرارية لتفريغ القبص، كان لابد من الاهتمام بتوليد القبص المستقر، الذي يتم عادة في الأنظمة الحلقية. يستقر التفريغ بتسليط المجال المغناطيسي الحلقي؛ بحيث يتساوى مع المجال السمتي الناتج من شدة تيار البلازما نفسه، والمجال الحلقي يخمد اللاستقرارية.

جهاز القبص ذات المجال المنقلب (RFP)، هو نظام حلقي متماثل محوريًّا؛ حيث تنحصر البلازما باتحاد المجال السمتي، الناتج من تيار البلازما الساري حول الوعاء، والمجال الحلقي الناتج من التيارات السارية في كل من البلازما والملفات الخارجية. وهذا الجهاز (RFP) يشبه، إلى حد كبير، نظام التوكاماك؛ حيث يتكون من وعاء حلقي الحاوي للبلازما، والمحاط بملفات حلقية، مسئولة عن توليد المجال المغناطيسي الحلقي B_T (انظر الشكل ٧). مسمى الجهاز مأخوذ من حقيقة المجال المغناطيسي، الحلقي في المنطقة الخارجية (حافة البلازما) ينقلب بالنسبة لاتجاهه كما بالشكل (٨). الفرق بين نظام التوكاماك والقبص، أن المجال المغناطيسي الحلقي B_T أكبر من المجال السمتي B_P في التوكاماك، بينما يتساوى المجالان –تقريبًا – في المقدار، في حالة القبص بالإضافة إلى انقلاب المجال الحلقي في المنطقة الخارجية للبلازما. البارامترات الأساسية التي تحدد شكل القبص، هي:

بارامتر القبص (θ)، الذي يحدد من العلاقة:

$$\theta = B_p(a)/\langle B_T \rangle$$

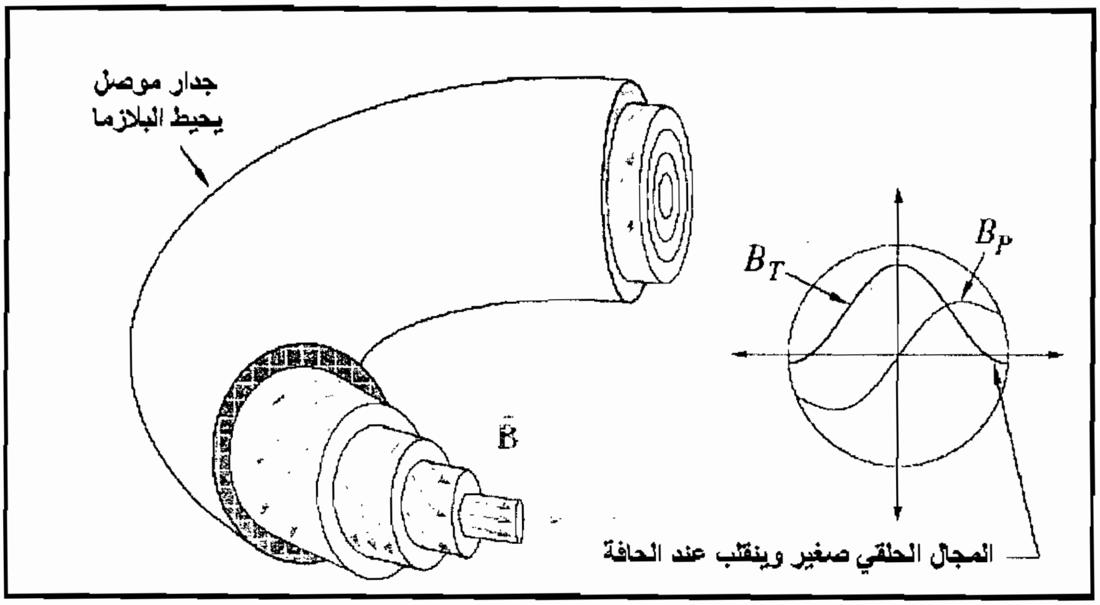
بارامتر الأنقلاب (F)، والذي يحدد من العلاقة:

$$F = B_T(a)/\langle B_T \rangle$$

حيث $B_T(a)$ و $B_P(a)$ هما المجالان: الحلقي والسمتي، عند الجدار $\langle B_T \rangle$ متوسط المجال الحلقي عبر المقطع العرضي للبلازما.



شكل (٣٠): القبص ذات المجال المتقلب.



شكل (٣١)

الفصل السادس
تطبيقات البلازما

طب البلازما

طب البلازما هو حقل الطب المبتكر، الذي يجمع بين فيزياء البلازما، وعلوم الحياة والطب السريري؛ لاستخدام البلازما الفيزيائية لتطبيقات علاجية. تؤكد التجارب الأولية أن البلازما يمكن أن تكون أداه فعالة في المطهرات، في الجسم الحي، دون التأثير على الأنسجة المحيطة بها. استنادًا إلى البحوث الأساسية المتطورة على تفاعل البلازما مع الأنسجة، والتطبيقات العلاجية الأولى في التئام الجروح، سيتم استخدام البلازما في علاج الأمراض الجلدية وطب الأسنان. البلازما هي الحالة الرابعة من المادة، تشمل: الجزيئات والذرات الفعالة والأيونات والإلكترونات، بالإضافة إلى أنها مصدر لفوتونات الأشعة الفوق البنفسجية. هذه البلازما تولد أصنافًا نشطة مفيدة لعديد من التطبيقات الطب الحيوي، مثل: تعقيم الأدوات الجراحية، والأنسجة الحية المزروعة. التطبيقات الحساسة للبلازما، مثل: تعريض جسم الإنسان، أو الأعضاء الداخلية للعلاج ممكنة أيضًا للأغراض الطبية.

البلازما غير الحرارية تحت الضغط الجوي للعلاج الطبي

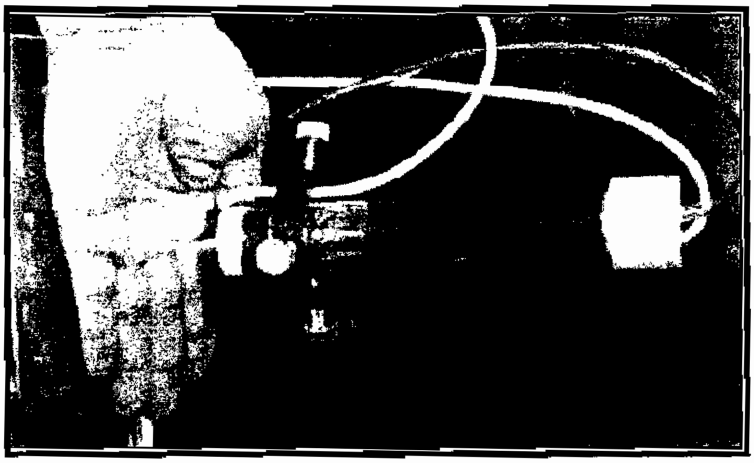
في الآونة الأخيرة، من أهم التحديات هي تطبيق البلازما غير الحرارية مباشرة على سطح جسم الإنسان، أو على الأعضاء الداخلية. بينما يمكن لتعديل الأسطح وإزالة التلوث البيولوجي، على حد سواء، للبلازما المتولدة تحت الضغط المنخفض والضغط الجوي. فقط مصادر البلازما المتولدة تحت الضغط الجوي قابلة للتطبيق؛ حيث يمكن استخدامها لتطبيقات علاجية مباشرة. وأحد مصادر البلازما، التي يمكن تطبيقها على الجسم البشري، تستند إلى مبدأ تفريغ حاجز العازل (DBD). يتألف جهاز DBD التقليدي من قطبين مستويين، على الأقل واحد منها مغطى بمادة عازلة، ويتم فصل الأقطاب بفجوة صغيرة تسمى فجوة التفريغ. ومع ذلك، لتطبيق أجهزة DBD في الأغراض الطبية،

فإن جسم الإنسان يمكن اعتباره أحد الأقطاب الكهربائية، وبالتالي القطب الأخر مغطى بمادة عازلة، مثل: الألومينا أو الكوارتز. من أهم التطبيقات الطبية لجهاز DBD، هو علاج الأمراض الجلدية والجروح وعلاج الورم، والتطهير من سطح الجلد.

والتفاعلية العالية للبلازما هي نتيجة مكونات البلازما المختلفة: الإشعاعات الكهرومغناطيسية (الأشعة فوق البنفسجية، والضوء المرئي، والأشعة تحت الحمراء، والمجالات الكهرومغناطيسية عالية التردد.. إلخ)، من جهة والأيونات والإلكترونات، والأنواع الكيميائية المتفاعلة والشقوق الكيميائية من ناحية أخرى.

النهج الأول للطب العلاجي بالبلازما: تؤكد الأمراض الجلدية والتئام الجروح التجارب الأولية أنه يمكن قتل العوامل المعدية، دون ردود فعل سلبية على خلايا الجسم السليمة المحيطة. وعلاوة على ذلك، فمن الممكن تحفيز العمليات الفسيولوجية والبيوكيميائية في الأنسجة الحية، عن طريق العلاج بالبلازما في ظل ظروف خاصة. وهذا يفتح إمكانة استخدام البلازما لدعم التئام الجروح، وكذلك لعلاج عديد من الأمراض الجلدية. لذلك، يتم توجيه تطبيق البحوث لتطوير المفهوم المتكامل لعلاج الجروح بالبلازما، التي تضم كلا من تنظيف الجروح السطحية والمطهرات، وتحفيز ترميم الأنسجة في طبقات الأنسجة العميقة. على أساس علمي متين، يوجد مزيد من التطبيقات، مثل: البلازما العلاجية في طب الأسنان، أو الجراحة، وسيتم افتتاحه خلال السنوات القادمة.

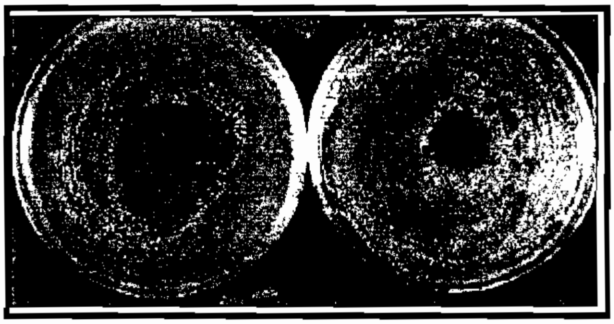
تخيل أن يهب نسيم بارد من الهيليوم على الجرح النازف ومراقبة تخثر الدم والجرح، يبدأ شفاء بمعدل أسرع مما تفعل عادة. يبدو بعيد المنال، ولكن فرق من العلماء من ذوي الخبرة في مجال العلوم البلازما، وعلم الأحياء الدقيقة والكيمياء الحيوية والطب يعملون على صنع شيء، من هذا القبيل، يحدث في الواقع. إنها لا تستخدم الهليوم بالضبط، ولكن بدلا الهليوم (أو الغازات الأخرى) في حالة تنشيط تسمى "بلازما". ويمكن للبلازما الباردة ملامسة الجلد دون الإضرار بها؛ مما يجعلها مثالية لتطهير الجروح.



الشكل (١): البلازما الباردة تلامس الجلد دون ضرر؛ مما يجعلها مثالية لتطهير الجروح.

تتراوح البلازما في درجة حرارة من (المسألة في بداية التفريغ الكهربي) حار جدًّا إلى (مسألة مختبر مكثف) بارد جدًّا. تهتم البلازما الطبية بما فيه الكفاية لإنتاج أنواع رد الفعل اللازمة لمعالجة فعالة، ولكن باردة بما يكفي لمغادرة الأنسجة سالمة. في العقد الماضي، كثفت البحوث بشأن استخدام البلازما في درجة حرارة منخفضة في الطب. وقد اكتشف الباحثون السبل، التي يمكن بها تطبيق البلازما مباشرة إلى الأنسجة الحية؛ لإيقاف مسببات الأمراض؛ لوقف نزيف دون إتلاف الأنسجة السليمة؛ لتطهير الجروح وتسريع التئام الجروح؛ وقتل انتقائي لبعض أنواع الخلايا السرطانية. تنتج البلازما كيميائيًّا الذرات والجزيئات التفاعلية، مثل: الهيدروكسيل والأكسجين الذري، التي يمكن أن تقتل البكتيريا الضارة عن طريق الأكسدة. وهذا أمر مهم؛ لأن أكسدة الدهون والبروتينات، التي تشكل غشاء الخلية، يمكن أن تؤدي إلى تعطيل كامل للغشاء. اكتشف الباحثون أن البكتيريا لا يمكن أن تتعامل مع البيئة القاسية، التي أوجدتها البلازما؛ إذ تقتل البكتيريا بأعداد كبيرة في غضون دقائق أو حتى ثوانٍ. لقد استغل العلماء هذه الخاصية من البلازما؛ لتطوير أجهزة البلازما التي يمكن استخدامها لتعقيم الأدوات الطبية، دون التعرض لخطر تعرضها لتلف. يتم تعقيم عديد من الأدوات الطبية الحديثة من البوليمرات الحساسة للحرارة بواسطة الوسائل التقليدية، مثل: جهاز الأوتوكليف، والذي يستخدم

ارتفاع ضغط البخار الساخن. يمكن أن تقتل استخدام أنواع البلازما التفاعلية، قرب درجة حرارة الغرفة، البكتيريا بسرعة والفيروسات والفطريات المودعة على أسطح الأدوات الجراحية والأجهزة الطبية، بما فيها تلك المصنوعة من البوليمرات الحساسة للحرارة. تفتح الخصائص الخاصة للبلازما الباردة آفاقًا جديدة للحماية من العوامل المعدية بدرجة عالية، مثل بريون، وهو بروتين شوه هيكليًّا، وهو المسؤل عن مرض "جنون البقر"، والتي هي مقاومة لجميع إجراءات التطهير التجارية. ويبدو أن أنواعًا من البلازما التفاعلية تسبب ضررًا قليلاً أو مقبولة لتعايش لدى الأنسجة الحيوانية والنباتية، في حين أنها قادرة على تدمير الخلايا البكتيرية. وبناء على ذلك، تم العثور على خلايا الجلد ليفية، تكون قادرة على البقاء في ظل ظروف البلازما، التي هي قاتلة للخلايا كولاي (شكل ٢). وهذه القدرة من البلازما الكافية لتدمير البكتيريا، وترك الأنسجة الحيوانية والنباتية سليمة، هي المفتاح لتطوير تطبيقات البلازما المهمة، بما في ذلك إزالة التلوث الغذائي وتطهير الجلد، والحد من الورم.



شكل (٢): يوضح تعرض أطباق بتري من الخلايا كولاي لمدة ١٢٠ ثانية إلى عمود البلازما الباردة (يسار – الهيليوم + أكسجين، واليمين – الهيليوم فقط). المناطق المظلمة في المركز "مناطق قتل"؛ حيث تم تدمير الخلايا البكتيرية، دون مضاعفة.

بالتشابه مع العلاج الكيميائي، فإن العلاج بالبلازما الباردة يبدو أن له القدرة على إحداث الموت المبرمج (موت الخلايا المبرمج) بين الخلايا السرطانية، وكبح التكاثر السريع للخلايا السرطانية، ولكن بأقل ضرر للأنسجة البشرية الحية. في نهاية المطاف، فإن نجاح هذا النهج يعتمد على إيجاد وصفات صحيحة لأصناف البلازما المتفاعلة، وتحريرها بشكل فعال في بيئة معقدة من

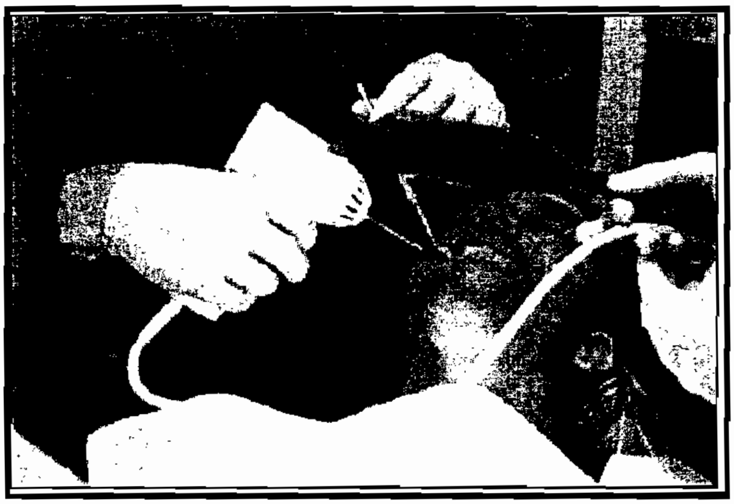
المواقع المريضة في الجسم البشري. وهناك أمل في أن يمكن تطوير تطبيقات البلازما الباردة من حل بعض من هذه التحديات الطبية الملحة. بينما يمكن أن تدمر البلازما مسببات الأمراض بجرعات كافية، وعند الجرعات المنخفضة يمكن أيضًا ان تعجل من تكاثر الخلايا، كخطوة مهمة في عمليات شفاء الجروح.

قدرة البلازما لقتل خلايا البكتيريا وتسريع تكاثر خلايا الأنسجة السليمة، معروفة باسم عملية "البلازما القاتلة / شفاء البلازما"، وقد قاد العلماء التحقيق في استخدام البلازما الباردة لرعاية الجروح. الجروح المزمنة، مثل قرح مرضى السكري، التي لا تستجيب بشكل جيد لطرق العلاج التقليدية. تحدث عشرات الآلاف من عمليات البتر كل عام في الولايات المتحدة؛ بسبب الأساليب الطبية الحالية، التي ليست لها القدرة على شفاء هذه الأنواع من الجروح. وعلى الرغم من أن تكنولوجيا البلازما القائمة لرعاية الجروح لا تزال في مرحلة البحث والاختبارات الاولية، إلا أنها تظهر علامات من العلاجات الناجحة لبعض أنواع الجروح المزمنة.

ثمة تطور مثير آخر هو استخدام البلازما الباردة في طب الأسنان، وقد أظهرت الأبحاث الحديثة أن البلازما يمكن أن تكون فاعلة للسيطرة على الأغشية الحيوية، عن طريق الفم. في مختبر بيئة البلازما، قد تبين إبطال نشاط البكتيريا التي تسبب تسوس الأسنان وأمراض اللثة. ويمكن إزالة الأنسجة المصابة في تجويف الأسنان، باستخدام البلازما، والاستعاضة عن مثقاب الأسنان الذي يخشاه الجميع. وتشير التطورات الأخيرة لأبحاث البلازما إلى أن أجهزة البلازما، في المستقبل، سوف تكون متاحة لأطباء الأسنان، وكذلك السماح لهم لعلاج الأمراض، التي تنتقل عن طريق الفم على نحو فعال، مع الألم قليلا لمرضاهم (شكل ٣).

يمكن أن تتواجد البلازما في صور متنوعة، كما يمكن أن تخلق بطرق مختلفة. في عديد من التطبيقات التكنولوجية، على سبيل المثال، بلازما الغاز الموجودة تحت الضغط المنخفض. ومن ناحية أخرى، الإضاءة هي مثال للبلازما الحرارية تحت الضغط الجوي، ومن المهم أن نميز بين البلازما الحرارية وغير الحرارية. في جميع البلازما التي يدعمها المجال الكهربي، تتلقى الإلكترونات الطاقة الخارجية أسرع بكثير من الأيونات الثقيلة، وتتاح

الفرصة للحرارة؛ لتصل إلى عدة آلاف من الدرجات قبل بيئتهم، مع ارتفاع درجات الحرارة. في البلازما غير حرارية التبريد من الأيونات والجزيئات غير المشحونة أكثر فعالية من نقل الطاقة من الإلكترونات، ولا يزال الغاز في درجة حرارة منخفضة؛ لهذا السبب تعرف البلازما غير الحرارية ببلازما غير متوازنة.



شكل (٣): استخدام البلازما في علاج تسوس الأسنان وأمراض اللثة.

من ناحية أخرى، في البلازما الحرارية، فيض الطاقة من الالكترونات للجسيمات الثقيلة، يوازن فيض الطاقة من الجسيمات الثقيلة إلى البيئة فقط، عندما تصبح درجة حرارة الجسيمات الثقيلة مساوية تقريبًا لدرجة حرارة الإلكترون. وبالطبع، فإن المصطلحات، حرارية وغير حرارية، والتوازن وعدم التوازن، ليست دقيقة جدًا. تعتمد بعض التطبيقات المبكرة للبلازما في الطب أساسًا على التأثير الحراري من البلازما. وقد تم استغلال الحرارة ودرجة الحرارة العالية في مجال الطب لفترة طويلة؛ لغرض إزالة الأنسجة، والتعقيم والكي (وقف النزيف).

وقدم بعض من التطبيقات، في وقت سابق، من البلازما في الطب بديل للكي الكهربي بتلامس المعادن. في تخثر البلازما الأرجونية (وتسمى أيضًا تخثر الحزمة الأرجونية)؛ لتحل البلازما عالية التوصيل محل الوصلات المعدنية؛ من أجل تمرير تيار خلال الأنسجة وتجنب صعوبات التصاق مع الأنسجة. أيضًا البلازما الساخنة التي تستخدم لقطع الأنسجة، على الرغم من أن الآلية

الدقيقة التي تحدث هذا القطع لا تزال غير واضحة. تستخدم الحرارة التي تحررها البلازما مؤخرًا لتجميل إعادة هيكلة الأنسجة.

أكثر ما يميز الأبحاث الأخيرة حول تطبيقات البلازما في الطب، هو استغلال التأثيرات غير الحرارية. التأثيرات غير الحرارية من البلازما واعدة جدًا ومثيرة للاهتمام، والسبب الرئيسي هو أنه يمكن ضبطها لمختلف الأغراض الفرعية القاتلة، مثل: التئام الجروح وانفصال الخلية، وغيرها. وعلاوة على ذلك، يمكن للتأثيرات غير الحرارية أن تكون انتقائية في تحقيق النتيجة المرجوة لبعض المادة الحية، في حين يوجد تأثير لايذكر على الأنسحة المحيطة. هذا هو الحال، على سبيل المثال، بلازما تخثر الدم وتعطيل البكتيريا، التي لا تسبب التسمم في الأنسجة الحية المحيطة.

تعقيم الأنسجة الحية الحيوانية والبشرية

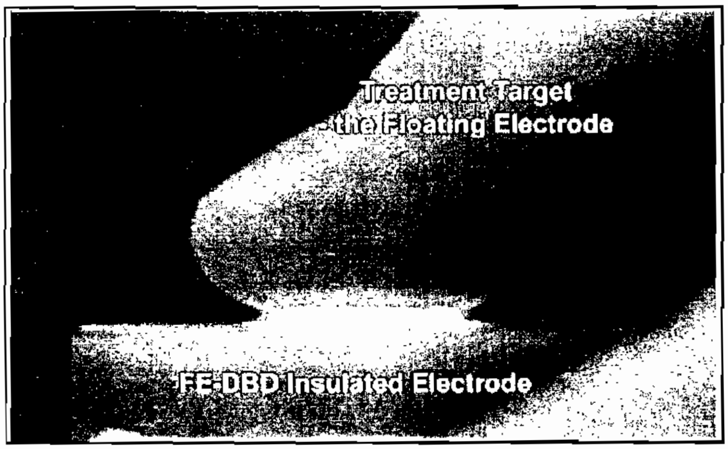
معالجة البلازما مباشرة تعني أن تستخدم الأنسجة الحية نفسها باعتبارها واحدة من الأقطاب الكهربائية، وتشارك مباشرة في عمليات التفريغ الكهربي وتفعيل البلازما. هكذا يوضح الشكل (٤) مباشرة العلاج بالبلازما (التعقيم) من جلد فأر حي؛ إذ يتم تفريغ حاجز العازل (DBD) البلازما في هذه الحالة بين قطب الجهد العالي المغطى سطحة بالكوارتز والفأر، التي هي بمثابة القطب الثاني.



شكل (٤): استخدام بلازما DBD لعلاج الأنسجة الحية.

يتطلب التطبيق المباشر للجهد العالي (١٠-٤٠ كيلو ڤولت) تفريغات البلازما غير الحرارية في الهواء في الضغط الجوي لعلاج الحيوانات الحية، والناس مستوى عاليًا من احتياطات السلامة. ضمان وسلامة الأنظمة غير المتضررة هي القضايا الحاسمة في الطب البلازما، وينبغي أن يقتصر تيار التفريغ أدنى من القيم المسموح بها لمعالجة الأنسجة الحية. وعلاوة على ذلك، ينبغي أن يكون التفريغ نفسه متجانسًا بما يكفي لتجنب الأضرار المحلية. خصوصية إنشاء التفريغ في الغلاف الجوي؛ لحل هذه المشكلات بشكل فاعل، يمثل تحديًا مهمًّا لطب البلازما.

قام فريدمان وآخرون بتطوير جهاز DBD ذات القب العائم؛ خصيصًا لهذا الغرض؛ حيث يتصل أحد الأقطاب بمصدر القدرة ومعزول للحماية، والقطب الثاني هو جلد الإنسان أو الحيوان. دون جلد الإنسان أو الحيوان أو الأنسجة التفريغ لا يتشعل. بمجرد أن يكون التفريغ الجوي آمنا يمكن تطبيقه مباشرة لجسم الإنسان، كما هو موضح بالشكل (٥).



الشكل (٥): تطبيق DBD مباشرة لجسم الإنسان.

ومن المعروف البلازما هي الحالة الرابعة من المادة بعد السوائل والمواد الصلبة والغازات، وتتشكل عندما تكون عالية الطاقة فى قطاع العمليات ذرات من الإلكترونات؛ لإنتاج تدفقات الغاز المتأين في درجة حرارة عالية. وعدد متزايد من التطبيقات التقنية والطبية والبلازما الساخنة، وتستخدم بالفعل لتطهير الأدوات الجراحية. وأوضح الدكتور سفيتلانا Svetolana، الذي أجرى البحث أن التطور الأخير في البلازما الباردة مع درجات الحرارة من ٣٥-

٤٠ درجة مئوية، يجعل التكنولوجيا خيارًا جذابًا لعلاج العدوى. "البلازما الباردة قادرة على قتل البكتيريا بواسطة الحمض النووي الميكروبية الضارة والبنى السطحية، دون أن تضر الأنسجة البشرية. والمهم هو أننا قد أظهرنا أن البلازما قادرة على قتل البكتيريا نموًا في الأغشية الحيوية في الجروح، وعلى الرغم من أن أكثر الأغشية الحيوية سمكا تظهر بعض المقاومة للعلاج."

يمكن أن تمثل تكنولوجيا البلازما في نهاية المطاف أفضل بديل للمضادات الحيوية، وفقًا للدكتور Ermolaeva. "عملنا يدل على أن البلازما هي فاعلة ضد البكتيريا المسببة للأمراض، مع المقاومة للمضادات الحيوية متعددة، وليس فقط في أطباق بتري، ولكن في جروح المصابين الفعلية"، قالت. "وهناك ميزة أخرى ضخمة للعلاج البلازما، هو أنه غير محدد؛ مما يعني أنها أصعب بكثير للبكتيريا لتطوير المقاومة. إنها الطريقة التي يتم الاتصال، وغير مؤلم حرا، ولا تسهم في التلوث الكيميائي للبيئة."

أمثلة لعمليات البلازما

تم تطوير عمليات البلازما؛ لتحقيق مجموعة متنوعة من خصائص سطح معين.

وهنا بعض الأمثلة:

تنظيف الأسطح

تكون معالجة البلازما بالأوكسجين آمنة وصديقة للبيئة وبديلة لطرق التنظيف التقليدية. تستخدم تشكيلة واسعة من الصناعات معالج البلازما الغازية لإزالة التلوث السطح العضوي من المواد، التي تتطلب تنظيفًا حرجًا. الأنواع النشطة في الأوكسجين، جنبا إلى جنب، مع طاقة الأشعة فوق بنفسجية يخلق التفاعل الكيميائي مع الملوثات السطحية؛ مما يؤدى إلى تطايرها وإزالتها من غرفة التفاعل. وتشمل التطبيقات تنظيف لوحات الدوائر لتحسين روابط الأسلاك، وإزالة التلوث العضوي من الشرائح الزجاجية والشاشات المسطحة، وتنظيف الأجهزة الطبية، وغيرها من المواد مثل المعادن والسيراميك المختلفة.

تعزيز التصاق

تحسين الالتصاق بين سطحين هو تطبيق شائع. الالتصاق الجيد يتطلب قوى بينية قوية عبر التوافق الكيميائي و / أو الروابط الكيميائية. ويمكن معالجة

البلازما للأسطح تساعد أيضًا في إنشاء مجموعات توظيفية نشطة كيميائيًّا، مثل: الأمينات، الكربونيل، ومجموعات الهيدروكسيل والكربوكسيل، لتحسين الالتصاق البيني. وتشمل التطبيقات الشائعة للمعالجة الأولية للقسطرة الطبية والدعامات القلبية الوعائية، ومكونات المحاقن، وأجزاء مضخة الغسيل الكلوي وأكياس بلاستيكية للأفلام المخدرات. كما يستخدم البلازما لتحسين قدرة الترابط على الطبقات التحتية، مثل: البوليمرات، والسيراميك والزجاج والمعادن المختلفة.

تستخدم البلازما حاليًا فى عديد من الدول المتقدمة؛ فى التخلص من المواد السامة الملوثة للبيئة، معتمدين على العمليات الكيميائية الفريدة، التى تتم داخل البلازما؛ حيث يمكن أن تقوم البلازما بتحويل المواد السامة المنبعثة من مداخن المصانع، ومن عوادم السيارات، مثل: غاز اكسيد الكبريت (SO) واكسيد النيتريك (NO) إلى مواد غير سامة. فعلى سبيل المثال قبل أن يخرج غاز NO من المدخنة إلى الغلاف الجوى، توجه عليه حزمة من الإلكترونات ذات طاقة عالية من جهاز مثبت فى منتصف المدخنة، تعمل على تأيين الغازات الموجودة (المادة السامة NO والهواء)؛ أى تحولها إلى حالة بلازما. وقبل خروجها إلى الجو، تكون مرحلة التأيين قد انتهت، وتتكون جزيئات النيتروجين والاكسجين نتيجة لعملية إعادة الاتحاد، وبهذا نكون قد حولنا الغازات الملوثة إلى غازات نافعة بتكاليف أقل.

يجدر الإشارة هنا إلى أنه تم حديثًا التوجه إلى معالجة الغازات المنطلقة من عوادم السيارات؛ حيث تم تركيب جهاز بلازما فى عادم السيارة؛ ليعالج الغازات السامة، قبل خروجها إلى الجو.

كذلك أجريت تجارب عديدة على الفضلات الصلبة والسائلة؛ حيث تستخدم بلازما عند درجات حرارة عالية، تصل إلى 6000 درجة مئوية، تعمل على تبخير وتحطيم المواد السامة، وتحولها إلى غازات غير سامة، وفى نهاية العملية يكون ماتبقى من مواد صلبة فى صورة زجاج. وتم فى أمريكا العام الماضى التخلص من حوالى 4000 مستودع، يحتوى على فضلات صلبة وملوثة للبيئة بواسطة البلازما. وقد كانت هذه الفضلات تدفن فى باطن الأرض؛ مما كانت تسبب أخطار تلوث. وباستخدام البلازما، يمكن حاليًا التخلص من 200 كيلوجرام، من المواد السامة فى الساعة.

تستخدم البلازما ذات درجات الحرارة المنخفضة فى عديد من المجالات الهامة على سبيل المثال، معظم الدوائر المتكاملة المعقدة جدًا، والتى تدخل فى تركيب كل جهاز إلكترونى، هذه الدوائر الإلكترونية تحتوى على عشرات الآلاف من الترانزستورات والمكثفات الموصلة ببعضها البعض بواسطة أسلاك قطرها فى حدود ٠,١ ميكرومتر، هذا النوع من التكنولوجيا الدقيقة والمعقدة تصنع باستخدام البلازما، حيث تقوم البلازما بنحت الدوائر الإلكترونية على شريحة السيليكون، بناءً على القناع المعدنى الموضوع أمام الشريحة.

فى هذه العملية يكون النحت على شريحة السليكون كالآتى:

حيث إن الإلكترونات داخل البلازما حرة الحركة وطاقتها أعلى من الأيونات الموجبة، فإنها تصل إلى أطراف البلازما بسرعة، وتقوم بدورها بجذب الأيونات الموجبة اتجاهها وتعجلها باتجاه الشريحة، وعند اصطدام الأيونات الموجبة بالمناطق المكشوفة على الشريحة تقوم بنحتها، وبعدها يستبدل القناع المعدنى بآخر مطبوع عليه الدوائر الكهربية الخاصة بالطبقة الثانية، وهكذا بالنسبة لباقي الطبقات حتى تتم عملية النحت.

مقصات البلازما

تعريف مقص البلازما: أداة تستعمل لقص الفولاذ والمواد الأُخرى. مقصات البلازما تبعث قوساً كهربائيًا من خلال غاز يمر بداخل فتحة محددة. الغاز قد يزن هواءً، نيتروجين، أرجون، أوكسجين، إلخ. يسبب هذا ارتفاعًا بدرجة حرارة الغاز، حتى مرحلة أن يدخل إلى الحالة الرابعة للمادة. كلنا نعرف الحالات الثلاث الأولى للمادة، أي: الصلب، السائل والغاز. العلماء يعرفون هذه الحالة الإضافية كالبلازما. بما أن المعدن الذي يتم قصه هو جزء من الدائرة، فإن الموصلية الكهربائية للبلازما تجعل القوس ينقل قوة العمل الخاصة به. الفتحة المحددة (الفوهة) والتي يمر الغاز من خلالها تسبب له أن يمر بسرعة فائقة، كالهواء العابر من خلال أنبوب كاربوراتور. الغاز فائق السرعة يقص في المعدن المصهور. الغاز موجه أيضاً حول محيط مساحة القص لصد القص.

عمليات الإنتاج بواسطة مقصات البلازما تستعمل الغاز كوسيلة لتمرير الطاقة الحرارية من مصدر للطاقة الكهربائية للمادة المعالجة. من الممكن تصنيف المعالجة بواسطة مقص البلازما بموجب صنفين من البلازما: البلازما الحارة

والبلازما الباردة، بموجب درجة الحرارة (وكثافة التأيُّن الناتجة) التي تصلها المواد الثقيلة. في البلازما الحارة، المواد الثقيلة لديها معدل درجة حرارة مساو للجزيئات الخفيفة (ابتداءً من 10000 درجة مئوية) البلازما تكون في حالة من التوازن الحراري. في البلازما الباردة، لا يكون الغاز في حالة من التوازن الحراري: للجزيئات الثقيلة درجة حرارة أقل بصورة غريبة (حوالي 500--800 درجة مئوية) بالمقارنة مع درجة الحرارة الإلكترونية.

درجات حرارة البلازما وحالاتها تؤثر على تطبيقاتها: تطبيقات البلازما الباردة تتعلق بالمناهج الحرارية، والتي تتطلب معالجة انتقائية ومحدودة للمواد (صهر انتقائي، معالجة الحرارة، تغييرات بنيوية، إلخ) وتفاعلات وتحولات كيميائية وفيزيائية. التطبيقات الرئيسية للبلازما الحارة تتعلق باللِّحام، والرش الحراري وقص المعادن.

القص بالبلازما الحارة يتم من خلال إنتاج قوس كهربائي في الغاز خاضع لتذبذبات كهربائية مختلفة. يستطيع الغاز المتأيِّن ذو الحرارة العالية، الناتج عن ذلك إزالة، وإذابة وتعديل المواد. حزمة البلازما هي أداة قابلة للسيطرة بسهولة، والتي لا تحتك مباشرة مع المواد المعالجة.

لقد تحسنت جودة القص بالبلازما بشكل ملحوظ نتيجة تقديم البلازما عالية الدقة (القص القوسي بالبلازما عالية التحمل خلال التسعينيات. القص بالبلازما عالية الدقة هو نتيجة تطوير تكنولوجيات سابقة، وبالتالي فقد استبدلت جزئيًّا قص البلازما العادي؛ وخاصة في المعالجة الضحلة. ومع ذلك، ومع الأخذ بعين الاعتبار هذه التطويرات المهمة (الحدود النظيفة، الحافات خالية التخشنات، تحديد للمساحة المعرضة للحرارة في حافّات مربعة بما فيه الكفاية)، فقد تم استعمال قص البلازما، ليس فقط في قص المواد (بغية التحضير للمعالجة فيما بعد)، بل أيضاً بغية الحصول على سطوح جيدة وميزات هندسية واسعة النطاق في قص المعادن.

جهاز الدفع الصاروخى بالبلازما

البلازما عبارة عن تجمع من جسيمات سالبة (الكترونات)، وأخرى موجبة (أيونات)، وهي بذلك تمتلك خواص تختلف أساسًا عن التي يمتلكها الغاز المحايد (ليس له شحنة كهربية)، ويمكن التحكم في البلازما عن طريق المجال المغناطيسي. كما أنها موصل جيد للكهرباء، فعند تمرير تيار كهربائي خلال البلازما واستخدام المجال المغناطيسي، ويمكن بذلك إخضاع البلازما لقوة

كهرومغناطيسية مشابهة لتلك التي يعمل بها المحرك الكهربي، وهذه القوة يمكن استخدامها بشكل فعال لزيادة سرعة البلازما ودفعها بسرعة عالية جدًّا قد تصل إلى ٦٠ كيلومترا في الثانية، وبهذه الطريقة يتم إنتاج قوة دفع يمكنها دفع أي مركبة فضائية في الفضاء.

ويطلق على هذا الجهاز الذي يقوم بتوليد وتسريع البلازما اسم صاروخ البلازما، أو محرك البلازما، أو «جهاز الدفع بالبلازما» Plasma Thruster، وهو عبارة عن صاروخ كهربائي لاعتماده على الطاقة الكهربية، بدلا من احتراق الوقود. ويركز مختبر الدفع بالبلازما على دراسة الفيزياء المعقدة للبلازما، وتطوير أنواع مختلفة من صواريخ البلازما.

وبالنسبة إلى أهمية تقنية الدفع بالبلازما في المركبات الفضائية، فإن معظم الصواريخ المستخدمة حاليًا في الفضاء، هي صواريخ كيميائية (بوقود كيميائي) تعتمد على عملية الاحتراق؛ أي تحرق الوقود السائل داخل حجرة الاحتراق لإنتاج غاز كهربي محايد، يخرج كعادم من الصاروخ بسرعة لاتتجاوز ٣ كيلومترات في الثانية. وكلما كانت سرعة الغاز الخارج من الصاروخ عالية، قلت نسبة الوقود المستخدم لدفع مركبة فضائية من مكان لآخر في الفضاء؛ ولذا نحتاج إلى عدة أطنان من الوقود لإرسال مركبة فضائية كبيرة مأهولة أو على متنها معدات ثقيلة. أما اذا استخدمنا صاروخ البلازما، الذي تصل سرعة العادم فيه الى ٦٠ كيلومتراً في الثانية، فإن وزن المادة الدافعة يمثل جزءًا صغيرًا بالمقارنة بتلك، التي يستخدمها الصاروخ الكيميائي.

جهاز تنقية الهواء "بلازما كلاستر":

هى تكنولوجيا تصدر أيونات مشحونة بشحن إيجابية وسلبية تطلق في الهواء. هذه الأيونات غير مستقرة، وعلى الفور تحيط بها جزيئات المياه التي في الهواء. تنتشر الجزيئات الناتجة عن التجمعات التي نسميها "بلازما كلاستر"، خارج القاعة، لربط الجزيئات والجسيمات المحمولة جوًّا. إن هذا النظام يعامل الهواء في منزلك بطريقة مماثلة للطريقة الطبيعية لتنظيف البيئة. تساعد أجهزة تنقية الهواء "بلازما كلاستر" في القضاء على روائح الحيوانات الأليفة، ودخان السجائر ورائحة المطبخ وتحسين الجو في الغرفة.

تبقي أجهزة تنقية الهواء الجوي "بلازما كلاستر" في منزلك جديدة ونظيفة، من خلال ثلاثة مرشحات مكافحة الغبار وحبوب اللقاح ودخان التبغ غير المباشر. الفلتر الأول مصمم لالتقاط الغبار والأوساخ، وفلتر الكربون النشط يزيل الروائح المنزلية المزمنة، يجسد فلتر HEPA أكثر من ٩٩,٩٧ ٪ من الجسيمات (يتجاوز حجمها ٠,٣ ميكرون) في الهواء، الذي يمر عليه، وله طبقة مغلفة مضادة للبكتيريا كحماية إضافية. على نفس القدر من الأهمية، فإن ثلاثي الترشيح يتميز بكفاءة النظام؛ حيث تستمر مرشحات HEPA والكربون النشط لمدة تصل إلى خمس سنوات، وهذا يتوقف على شروط الاستخدام والغرفة.

وكذلك فإنها سهلة التشغيل للمحافظة على الجهد. وتشمل كلا النموذجين شارب رائحة الاستشعار التلقائي، وهو مجس أو حساس لاستشعار رائحة الغرفة؛ وهذا الاستشعار لحماية إضافية من الأسر الأكثر شيوعا للحساسية، ولكل من هذه القوى أجهزة تنقية الهواء وتعبئتها، ومن البديهي أن يتم ذلك باستخدام جهاز التحكم عن بعد.

وحدات وثوابت

UNITS AND CONSTANTS

- SI units: meters (m), kilograms (kg), seconds (s), coulombs (C)

  $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, electron charge $= -e$

- Energy unit is joule (J)

  Often use electron-volt

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- Temperature unit is kelvin (K)

  Often use equivalent voltage of the temperature:

$$\boxed{\mathrm{T}_e(\text{volts}) = \frac{kT_e(\text{kelvins})}{e}}$$

where k = Boltzmann's constant $= 1.38 \times 10^{-23}$ J/K

$$\boxed{1 \text{ V} \Longleftrightarrow 11,600 \text{ K}}$$

- Pressure unit is pascals (Pa); 1 Pa = 1 N/m^2

  Atmospheric pressure $\approx 10^5$ Pa $\equiv$ 1 bar

  Often use English units for gas pressures

  Atmospheric pressure = 760 Torr

$$1 \text{ Pa} \Longleftrightarrow 7.5 \text{ mTorr}$$

ثوابت فيزيقية

Fundamental Physical Constants

Quantity	Symbol	Best Value[6]	Relative Uncertainty ($\times 10^{-6}$)
electron mass	m_e	$9.109\,3897 \times 10^{-31}$ kg	0.59
proton mass	m_p	$1.672\,6231 \times 10^{-27}$ kg	0.59
elementary charge	e	$1.602\,177\,33 \times 10^{-19}$ C	0.30
speed of light in vacuum	c	299 792 458 m/s	exact[7]
permeability of vacuum	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m	exact
permittivity of vacuum	ϵ_0	$1/\mu_0 c^2$ F/m	exact
gravitational constant	G	$6.672\,59 \times 10^{-11}$ $N \cdot m^2/kg^2$	128
Planck constant	h	$6.626\,0755 \times 10^{-34}$ $J \cdot s$	0.60
Boltzmann constant	k_B	$1.380\,658 \times 10^{-23}$ J/K	8.5

SI Units And Their Abbreviations, Interrelationships

Quantity	Name	Symbol	In Terms Of Other Units
length	meter	m	10^2 cm = 10^{10} Å
mass	kilogram	kg	10^3 g
time	second	s	
electric current	ampere	A	C/s
temperature	kelvin	K	$\simeq 1/11\,604.4$ eV
amount of substance	mole	mol	
atomic unit of energy	electron volt	eV	$\simeq 1.602\,177\,33 \times 10^{-19}$ J
atomic unit of mass	amu	u	$\simeq 1.660\,5402 \times 10^{-27}$ kg
frequency	hertz	Hz	s^{-1} (cycles per second)
force	newton	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
pressure, stress	pascal	Pa	$N/m^2 = m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
energy, work	joule	J	$N \cdot m = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
power	watt	W	$J/s = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
electric charge	coulomb	C	$s \cdot A$
electric potential	volt	V	$W/A = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
capacitance	farad	F	$C/V = m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
electrical resistance	ohm	Ω	$V/A = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
magnetic flux	weber	Wb	$V \cdot s = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
magnetic flux density[8]	tesla	T	$Wb/m^2 = kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
inductance	henry	H	$Wb/A = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$

Other Physical Constants

Quantity	Symbol	Value
Avogadro constant	N_A	6.022×10^{23} #/mol
Molar gas constant	R	$8.31\ \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$
Air (20°C and 1 atmosphere)		
density	n	2.49×10^{25} molecules/m^3
sound speed	c_S	343 m/s
atmospheric pressure	p	760 Torr = 1.01×10^5 Pa
molecular weight		28.9 g/mol
viscous diffusivity	μ^m/ρ_m	$1.5 \times 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}$
Water		
density	n	3.33×10^{28} molecules/m^3
sound speed	c_S	1460 m/s
viscous diffusivity	μ^m/ρ_m	$10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$
Earth		
mass	M_E	5.98×10^{24} kg
mean radius	R_E	6.37×10^6 m
gravitational acceleration	g	$9.81\ \text{m/s}^2$
magnetic dipole moment	M_d	$8.0 \times 10^{22}\ \text{A}\cdot\text{m}^2$

Particle Masses

Particle or Atom	Symbol	Atomic Number Z	Best Atomic Mass[9] Value	Energy Units (mc^2/e, MeV)
electron	m_e		0.000 548 579 903	0.511
muon	m_μ		0.113 428 913	105.658
proton	m_p	1	1.007 276 470	938.272
neutron	m_n		1.008 664 904	939.566
deuteron	m_D	1	2.013 553 214	1 875.613
triton	m_T	1	3.016 050	2 809.853
helium	m_{He}	2	4.002 603	3 728.402
carbon	m_C	6	12.011 15	
nitrogen	m_N	7	14.006 7	
oxygen	m_O	8	15.999 4	
argon	m_{Ar}	18	39.948	
iron	m_{Fe}	26	55.845	
molybdenum	m_{Mo}	42	95.94	
tungsten	m_W	74	183.84	

بارامترات البلازما الأساسية

كل الكميات مقدرة بوحدات cgs (الجاوسي) عدا درجة الحرارة تقدر بوحدة الكترون فولت eV وكتلة الأيون m_i يعبر عنها بكتلة البروتون $\mu = m_i / m_p$ و Z حالة الشحنة، k ثابت بولتزمان، K العدد الموجي، γ المعامل الأديابتيكي و $\ln\Lambda$ لوغاريتم كولوم.

الترددات

Frequencies

electron gyrofrequency	$f_{ce} = \omega_{ce}/2\pi = 2.80 \times 10^6 B$ Hz
	$\omega_{ce} = eB/m_e c = 1.76 \times 10^7 B$ rad/sec
ion gyrofrequency	$f_{ci} = \omega_{ci}/2\pi = 1.52 \times 10^3 Z\mu^{-1} B$ Hz
	$\omega_{ci} = ZeB/m_i c = 9.58 \times 10^3 Z\mu^{-1} B$ rad/sec
electron plasma frequency	$f_{pe} = \omega_{pe}/2\pi = 8.98 \times 10^3 n_e{}^{1/2}$ Hz
	$\omega_{pe} = (4\pi n_e e^2/m_e)^{1/2}$
	$= 5.64 \times 10^4 n_e{}^{1/2}$ rad/sec
ion plasma frequency	$f_{pi} = \omega_{pi}/2\pi$
	$= 2.10 \times 10^2 Z\mu^{-1/2} n_i{}^{1/2}$ Hz
	$\omega_{pi} = (4\pi n_i Z^2 e^2/m_i)^{1/2}$
	$= 1.32 \times 10^3 Z\mu^{-1/2} n_i{}^{1/2}$ rad/sec
electron trapping rate	$\nu_{Te} = (eKE/m_e)^{1/2}$
	$= 7.26 \times 10^8 K^{1/2} E^{1/2}$ sec^{-1}
ion trapping rate	$\nu_{Ti} = (ZeKE/m_i)^{1/2}$
	$= 1.69 \times 10^7 Z^{1/2} K^{1/2} E^{1/2} \mu^{-1/2}$ sec^{-1}
electron collision rate	$\nu_e = 2.91 \times 10^{-6} n_e \ln\Lambda T_e{}^{-3/2}$ sec^{-1}
ion collision rate	$\nu_i = 4.80 \times 10^{-8} Z^4 \mu^{-1/2} n_i \ln\Lambda T_i{}^{-3/2}$ sec^{-1}

الأطوال

Lengths

electron deBroglie length	$\lambda = \hbar/(m_e kT_e)^{1/2} = 2.76 \times 10^{-8} T_e{}^{-1/2}$ cm
classical distance of minimum approach	$e^2/kT = 1.44 \times 10^{-7} T^{-1}$ cm
electron gyroradius	$r_e = v_{Te}/\omega_{ce} = 2.38 T_e{}^{1/2} B^{-1}$ cm
ion gyroradius	$r_i = v_{Ti}/\omega_{ci}$ $= 1.02 \times 10^2 \mu^{1/2} Z^{-1} T_i{}^{1/2} B^{-1}$ cm
electron inertial length	$c/\omega_{pe} = 5.31 \times 10^5 n_e{}^{-1/2}$ cm
ion inertial length	$c/\omega_{pi} = 2.28 \times 10^7 Z^{-1} (\mu/n_i)^{1/2}$ cm
Debye length	$\lambda_D = (kT/4\pi ne^2)^{1/2} = 7.43 \times 10^2 T^{1/2} n^{-1/2}$ cm

السرعات

Velocities

electron thermal velocity	$v_{Te} = (kT_e/m_e)^{1/2}$ $= 4.19 \times 10^7 T_e{}^{1/2}$ cm/sec
ion thermal velocity	$v_{Ti} = (kT_i/m_i)^{1/2}$ $= 9.79 \times 10^5 \mu^{-1/2} T_i{}^{1/2}$ cm/sec
ion sound velocity	$C_s = (\gamma Z k T_e/m_i)^{1/2}$ $= 9.79 \times 10^5 (\gamma Z T_e/\mu)^{1/2}$ cm/sec
Alfvén velocity	$v_A = B/(4\pi n_i m_i)^{1/2}$ $= 2.18 \times 10^{11} \mu^{-1/2} n_i{}^{-1/2} B$ cm/sec

علاقات دون أبعاد

Dimensionless

number of electrons in Debye cube

$$n_e \lambda_{De}^3 \simeq 4.1 \times 10^{11} \, [T_e(\text{eV})]^{3/2}/\sqrt{n_e}$$

Coulomb logarithm

$$\ln \Lambda \equiv \ln\left(\frac{\lambda_D}{\max\{b_{\min}^{\text{cl}}, b_{\min}^{\text{qm}}\}}\right)$$

$$b_{\min}^{\text{cl}} = Z_i/(12\pi n_e \lambda_{De}^2) \simeq 5 \times 10^{-10} Z_i/T_e(\text{eV}) \ \ \text{m}$$

$$b_{\min}^{\text{qm}} = h/(4\pi m_e v) \simeq 1.1 \times 10^{-10}/[T_e(\text{eV})]^{1/2} \ \ \text{m}$$

plasma to magnetic pressure

$$\beta \equiv \frac{P}{B^2/2\mu_0} = \frac{n_e T_e + n_i T_i}{B^2/2\mu_0}$$

$$\simeq 4.0 \times 10^{-25} \left(\frac{n_e}{B^2}\right) \left[T_e(\text{eV}) + \frac{n_i}{n_e} T_i(\text{eV})\right]$$

Lundquist number

$$S \equiv \frac{a^2/(\eta/\mu_0)}{L_\parallel/c_A}$$

$$\simeq 1.6 \times 10^{13} \, \frac{a^2 B \, [T_e(\text{eV})]^{3/2}}{L_\parallel \, Z_i \sqrt{n_i A_i}} \left(\frac{17}{\ln \Lambda}\right)$$

المراجع

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics).
2. Anderson J. D. (1991) Fundamental of Aerodynamics Mc-grow. Hill, New York
3. Fridman G, Fridman A, Peddinghaus M, Balasubramanian M, Gutsol A, Friedman G (2005) From Plasma Biology to Plasma Medicine: Sterilization, Tissue Engineering, Treatment of Surface Wounds and Skin Diseases. in The 58th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC). San Jose, CA, USA
4. Kalghatgi, S. U., Fridman, G., Cooper, M., Nagaraj, G., Peddinghaus, G., Balasubramanian, M., Vasilets, V. N., Gutsol, A., Fridman, A., Fridman, G. 2007. Mechanism of Blood Coagulation by Non-Thermal Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma, IEEE Trans. Plasma Sci. 35(5): 1559-1566.
5. Francis Chen, 1974, 1988, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, Plenum Press.
6. Yaffa & Shalom Eliezer, 1989 (2nd edition, 2001), The Fourth State of Matter, Hilger, Bristol.
7. Goldston R. J. and Rutherford P. H., (1995) Introduction to Plasma Physics, IOP.
8. Lindl J., (1998), Inertial Confinement Fusion, Springer.
9. Wesson J., (2004), Tokomaks, 3rd ed., Oxford Univ. Press.
10. McCracken G. and Stott P., (2005) Fusion: The Energy of the Universe, Elsevier.